Direction des eaux intérieures
Conservation et Protection
Région du Québec

Inland Waters Directorate
Conservation and Protection
Québec Region

WATDOC
document referenced by WATDOC
return to WATDOC if removed from OOFF collection
document retenu par WATDOC
retourner à WATDOC si enlevé de la collection OOFF

Environnement Canada

Environment Canada

ENVIRONNEMENT CANADA
REGION DU QUEBEC
CONSERVATION ET PROTECTION
DIRECTION DES EAUX INTERIEURES

ENVIRONMENT CANADA
QUEBEC REGION
CONSERVATION AND PROTECTION
INLAND WATERS BRANCH

BILANS IONIQUES ET CHANGEMENTS DANS LA QUALITE DE L'EAU AU BASSIN CALIBRE DU LAC LAFLAMME DE 1981 A 1988

Canada

BILANS IONIQUES ET CHANGEMENTS DANS LA QUALITE DE L'EAU AU BASSIN CALIBRE DU LAC LAFLAMME DE 1981 A 1988

par

Madeleine Papineau

Environnement Canada
Région du Québec
Conservation et Protection
Direction des eaux intérieures

Juillet 1989

REMERCIEMENTS

Je remercie le personnel de nos bureaux de Sainte-Foy, de Longueuil et du laboratoire national de Burlington ainsi que les nombreux étudiants qui ont participé au travail de terrain, aux analyses de laboratoire et aux traitements informatiques. Je tiens à remercier particulièrement Suzanne Couture, John Haemmerli et Denis Labonté pour leurs collaborations à cette étude du bilan ionique du lac Laflamme.

RESUME

L'acquisition des données qualitatives et quantitatives pour évaluer les bilans ioniques au bassin calibré du lac Laflamme s'est poursuivie de 1981 à 1988. Ce lac de tête de la forêt boréale reçoit une quantité importante de précipitation annuellement (1,3 m) et une charge atmosphérique humide de sulfates entre 16 et 23 kg/ha. Le pH moyen des précipitations est de 4,4. Ces valeurs de pH et de dépôts de sulfates se situent près du milieu des gammes mesurées pour la province du Québec. De 1981 à 1985, il y a eu des augmentations dans les concentrations et les charges des nitrates et une diminution du pH dans les précipitations. Par la suite, la tendance s'est renversée. Donc de 1981 à 1987, il y a une tendance décroissante nette dans les charges atmosphériques de sulfates.

Dans le bassin, il y a peu de neutralisation de l'acidité des précipitations par la voûte forestière. Par contre, une neutralisation importante a lieu dans les sols et les dépôts meubles. L'écoulement sous-terrain contribue à 78% de la recharge totale du lac. Au printemps, l'apport direct d'eau de fonte acide et l'écoulement hypodermique contribuent à l'acidification de la couche superficielle du lac.

Sur une base annuelle, la composition du lac est dominée en terme d'équivalent par le calcium et les bicarbonates. Le pH moyen de l'eau est de 6,4. De 1982 à 1985, il semble y avoir eu acidification des eaux de surface au lac Laflamme (augmentation des sulfates, diminution de l'alcalinité) et dans les cinq lacs TADPA avoisinants (augmentation des sulfates et diminution du pH). Après 1985, au lac Laflamme, il y a eu une diminution prononcée des concentrations et des charges exportées des nitrates et de l'ion hydrogène ainsi qu'une augmentation de la couleur et une légère diminution des concentrations de sulfates. Dans les lacs avoisinants, les sulfates ont également diminué mais l'acidification ne s'est pas renversée dans tous les lacs. Certains lacs ont conservé un pH inférieur à 6 malgré la diminution des apports à moins de 20 kg/ha/an.

Le bilan net des composants chimiques majeurs est une accumulation dans le bassin du lac Laflamme de l'ion hydrogène, des nitrates et de l'ion ammonium et une exportation nette du calcium, du magnésium, du sodium, du potassium, des chlorures et des sulfates.

ABSTRACT

From 1981 to 1988, qualitative and quantitative data needed to establish ion budgets have been gathered in the Laflamme Lake Calibrated Watershed (LLW). This headwater lake within a boreal forest receives a large amount of annual precipitation (1,3 m) and a wet sulfate loading of between 16 and 23 kg/ha per year. The average pH of precipitation is 4,4. Both pH and sulfate loading are close to the middle of the range of these values measured in the province of Quebec. From 1981 to 1985, increases in concentration and loading of nitrate ions as well as a decrease in pH were detected in precipitations. Afterwards, the trends reversed. Thus from 1981 to 1987, there was a net decrease in wet sulfate loading at this site.

In the watershed, there is little buffering of acidic precipitation by the forest canopy. However, the soil and surficial deposits provide substantial buffering. Groundwater recharge to the lake has been estimated to be 78% of total recharge. In the spring, the direct input of acidic meltwater and recharge by shallow flow leads to the acidification of the surface layer of the lake.

On a yearly basis, lake water composition is dominated on an equivalent basis by calcium and bicarbonate ions. The average lake pH is 6,4. From 1982 to 1985, there is some indication of an acidification of surface waters in the LLW (increase in sulfates, decrease in alkalinity) and in five nearby LRTAP lakes (increase in sulfates, decrease in pH). After 1985, in the LLW, there was a pronounced decrease in the concentrations and stream outputs of nitrate and hydrogen ions as well as an increase in color and a slight decrease in sulfates. In the nearby lakes, sulfates also decreased but lake acidification was not reversed in all lakes. Some lakes maintained a pH below 6 despite a wet sulfate loading below 20 kg/ha.

The net bubget of major chemical components in the LLW is a retention in the catchment of hydrogen, nitrate and ammonium ions and a release of calcium, sodium, magnesium, potassium, chloride and sulfate.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
REMERCIEMENTS	v
RESUME	vii
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIERES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
INTRODUCTION	1
1. DESCRIPTION DU SITE	2
1.1 Localisation, superficie et topographie	2
1.2 Climat	2
1.3 Géologie	6
1.4 Sols	7
1.5 Végétation	7
1.6 Réseau de drainage	8
1.7 Qualité de l'eau	9
1.8 Population de poissons	10
1.9 Utilisation du territoire	10
2. MÉTHODES	11
2.1 Précipitations	12
2.2 Lac et exutoire	12
3. LES PRÉCIPITATIONS	15
3.1 Le volume des précipitations	15
3.2 Concentrations des ions	17
3.2.1 pH	17
3.2.2 Autres composantes	25
3.2.3 Tendances temporelles des ions majeurs	28
4. LE BASSIN VERSANT	33
4.1 La voûte forestière	33
4.2 Le couvert de neige	38
4.3 La fonte de la neige	40
4.3.1 Qualité des apports au lac durant la fonte	42
4.3.2 Cheminements des eaux de fonte	46

4.4 L'influence des sols..... 49
4.5 Les eaux souterraines..... 54

5. CHIMIE DU LAC ET DE L'EXUTOIRE..... 56

5.1 Le régime thermique..... 56
5.2 La composition chimique annuelle du lac et de l'exutoire..... 57
5.3 Les lacs TADPA avoisinants le lac Laflamme.... 64
5.4 Description statistique des séries temporelles du lac Laflamme..... 67

5.4.1 Alcalinité, calcium, magnésium, sodium conductivité et phosphore..... 70
5.4.2 Nitrates, ion hydrogène, potassium, fer, manganèse et zinc..... 73
5.4.3 Couleur, sulfates, chlorures et aluminium 76

5.5 Relation entre les tendances temporelles des précipitations et des eaux de surface..... 81

6. BILAN D'EAU ET DE MASSE DU BASSIN VERSANT..... 91

6.1 Bilan d'eau..... 91
6.1.1 Précipitations brutes et écoulement..... 91
6.1.2 Bilan détaillé..... 92

6.2 Bilans chimiques..... 98
6.2.1 Les apports atmosphériques..... 99
6.2.2 Exportations à l'exutoire..... 108
6.2.3 Bilans chimiques annuels..... 118

CONCLUSION..... 121

REFERENCES..... 125

ANNEXE 1..... 133
ANNEXE 2..... 134
ANNEXE 3..... 138
ANNEXE 4..... 139
ANNEXE 5..... 154

LISTE DES TABLEAUX

		PAGE
1	Caractéristiques du bassin versant du lac Laflamme	3
2	Programme d'échantillonnage et publication des données utilisées pour le bilan ionique	11
3	Méthodes analytiques pour les précipitations et les eaux de surface	13
4	Précipitations et écoulements annuels au lac Laflamme	15
5	Moyennes annuelles pondérées des paramètres dans les précipitations	21
6	Le pH des précipitations selon la provenance des masses d'air. Décembre 1983 à Novembre 1984	22
7	Moyennes saisonnières des composantes principales des précipitations	29
8	Concentrations (µeq/l) des paramètres dans les compartiments du bassin versant	35
9	Les charges ioniques du couvert forestier - Mai à octobre 1982 (kg/ha)	38
10	Les charges ioniques du couvert de neige avant la fonte	41
11	Répartition de l'écoulement durant la fonte	48
12	Les effets de l'acidification expérimentale sur la capacité d'échange cationique (mole/kg x 100) et sur la saturation en base (%) sur des colonnes de sol en laboratoire	53
13	Moyennes annuelles des paramètres chimiques au centre du lac Laflamme	58
14	Moyennes annuelles des paramètres chimiques à l'exutoire du lac Laflamme	62
15	Statistiques descriptives: calcium (mg/l)	68

16 Tests non paramétriques utilisés sur les séries temporelles des paramètres de qualité de l'eau au lac Laflamme..... 69

17 Moyennes saisonnières des paramètres dans l'eau du lac Laflamme 1981-1988..... 71

18 Apport acidifiant et capacité de neutralisation des lacs TADPA avoisinants..... 88

19 Charges annuelles des paramètres de qualité dans dans les précipitations au lac Laflamme (kg/ha)... 100

20 Charges saisonnières des composantes principales des précipitations (kg/ha)..... 104

21 Contribution des dépôts secs à la déposition totale à la Forêt Montmorency..... 107

22 Dépôts atmosphériques de sulfates (kg/ha) pour 15 stations du REPQ..... 110

23 Charges annuelles exportées à l'exutoire (kg/ha).. 111

24 Bilan ionique du lac Laflamme (kg/ha)..... 119

LISTE DES FIGURES

		PAGE
1	Localisation du bassin versant du lac Laflamme....	4
2	Topographie du bassin versant du Lac Laflamme.....	5
3	Bathymétrie du lac Laflamme.....	5
4	Précipitations et écoulements par année hydrologique au lac Laflamme.....	16
5	Précipitations et écoulements mensuels moyens au lac Laflamme (1981-1988).....	18
6	Histogrammes des pH, des sulfates et des nitrates dans les précipitations.....	20
7	pH annuel des précipitations des stations du REPQ en 1986.....	23
8	pH et concentrations des sulfates dans les précipitations des stations du RCEPA en 1987.....	25
9	Composition des précipitations au lac Laflamme....	26
10	Variations annuelles des concentrations de l'ion hydrogène, des sulfates, des nitrates et de l'ion ammonium dans les précipitations (1981-1987).....	27
11	Saisonnalité des concentrations de l'ion hydrogène, des sulfates, des nitrates et de l'ion ammonium dans les précipitations.....	30
12	Variations temporelles de l'ion hydrogène, des sulfates, des nitrates et de l'ion ammonium dans les précipitations.....	31
13	Modifications des cations lors du passage dans le bassin versant du lac Laflamme.....	36
14	Modifications des anions lors du passage dans le bassin versant du lac Laflamme.....	37
15	Évolution de la qualité de l'eau durant la fonte printannière (1983, 1985).....	43
16	Moyennes annuelles des ions majeurs de l'eau du lac	59
17	Composition de l'eau du lac Laflamme (1981-1988)..	60
18	Composition relative de l'eau de l'exutoire.....	63

19 Caractéristiques chimiques de l'eau des lacs TADPA et du lac Laflamme (échantillonnage bi-annuel).... 65

20 Émissions des oxydes de soufre et d'azote au Québec 82

21 Dépôts atmosphériques de sulfates et concentration de sulfates et alcalinité dans l'eau de surface au lac Laflamme..... 85

22 Evolution du pH et des sulfates de l'eau des lacs Bonneville et Lagou..... 86

23 Evolution du pH et des sulfates de l'eau des lacs Veilleux et McCleod..... 87

24 Dépôts atmosphériques de l'ion hydrogène et des nitrates et leurs concentrations dans l'eau du lac Laflamme..... 89

25 Précipitations et écoulement par saisons au lac Laflamme..... 93

26 Précipitations et hydrogrammes hebdomadaires de 1981 à 1984..... 94

27 Précipitations et hydrogrammes hebdomadaires de 1985 à 1988..... 95

28 Bilan hydrique du bassin du lac Laflamme. Juin 1983-Mai 1984..... 96

29 Bilan ionique annuel des sulfates..... 101

30 Bilan ionique annuel de l'ion hydrogène..... 102

31 Bilan ionique annuel des nitrates..... 103

32 Bilan ionique annuel des chlorures et de l'ion ammonium..... 106

33 Dépôts humides des sulfates au Québec en 1986..... 109

34 Bilan ionique annuel du calcium, du magnésium, du sodium et du potassium..... 112

35 Exportations de l'alcalinité, de l'aluminium, du fer, du phosphore, du manganèse et du zinc..... 113

36 Evolution temporelle des exportations de l'ion hydrogène, des sulfates et des nitrates..... 115

37 Charges saisonnières des nitrates et de l'ion hydrogène à l'exutoire..... 116

INTRODUCTION

Depuis 1980, l'approche de bassin calibré a été employée pour l'étude et l'évaluation des effets du transport à distance des polluants atmosphériques (TADPA) sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. Cinq sites principaux ont servi au suivi intensif de l'écosystème ainsi qu'à la détermination des bilans de masses soit la région des lacs expérimentaux (Ont), les lacs Turkey (Ont), la région de Muskoka Haliburton (Ont), le lac Laflamme (Qc) et Kejimkujik (N.E.). Ces bassins représentent des régions et des climats différents ainsi qu'une gamme de sensibilité du territoire et de dépositions atmosphériques (Jeffries et al., 1988).

Avec l'émergence de nouvelles préoccupations sur le transport atmosphérique (NO_x, COV) et sur le changement climatique, il est devenu important de synthétiser l'information de près d'une décennie de travail sur les effets des polluants atmosphériques acidifiants sur le milieu aquatique. Dans ce contexte, le rapport synthèse de cinq ans sur le bassin calibré du lac Laflamme (Papineau, 1987) a été mis à jour. En plus des informations sur le site lui-même, la méthodologie, les précipitations, le bassin versant, l'eau du lac et de l'exutoire et les bilans hydriques et ioniques, deux blocs importants ont été ajoutés. Le premier porte sur la détection de tendances temporelles dans les séries de concentrations et de charges à l'aide de tests non paramétriques, nécessaire au suivi à long terme des changements dans le milieu aquatique et l'évaluation des conséquences des programmes de contrôle des émissions d'anhydride sulfureux. L'autre bloc porte sur cinq lacs situés près du bassin calibré et permet d'étudier les effets des charges atmosphériques sur des lacs de sensibilités différentes. L'ensemble de six lacs forme un noyau pour un site d'un réseau intégré.

1. DESCRIPTION DU SITE

Le bassin versant du lac Laflamme fait partie d'une forêt boréale de sapins baumiers de 200 000 km^2 qui s'étend sur le Québec d'ouest en est. Le bassin versant est situé sur le Plateau laurentien, une aire ayant un relief général sans forme réellement contrastée et présentant une surface légèrement ondulée entaillée par quelques fractures à l'échelle régionale. Ce lac de tête se déverse dans la rivière Montmorency qui s'écoule vers le sud pour rejoindre le fleuve Saint-Laurent à l'est de la ville de Québec. Les caractéristiques principales du bassin versant sont données au tableau 1.

1.1 Localisation, superficie et topographie

Le bassin versant du lac Laflamme est localisé dans la Forêt Montmorency, 80 km au nord de la ville de Québec (figure 1). Le lac est situé à une latitude de 47°19' et une longitude de 71°07'. L'altitude varie de 777 m à 884 m. Le bassin versant couvre une superficie de 68,4 ha dont le lac occupe 6,1 ha. Le relief est régulier et le versant nord offre des élévations supérieures et des pentes plus fortes que le versant sud du bassin (Plamondon, 1981) (figure 2).

1.2 Climat

Le climat de la région est caractérisé par des températures basses et des précipitations abondantes. Les étés sont courts et frais et les hivers sont longs et froids. La circulation dominante des masses d'air est de l'ouest vers l'est. L'air affectant le bassin versant est donc surtout de type continental.

TABLEAU 1

Caractéristiques du bassin versant du lac Laflamme

Latitude	47°19'
Longitude	71°07'
Superficie totale du bassin	0,684 km^2
Altitude (min)	777 m
Altitude (max)	884 m
Pente (min)	0%
Pente (max)	30%
Pente moyenne arithmétique	8,6%
Superficie du lac	0,061 km^2
Périmètre du lac	1,02 km
Profondeur du lac (max)	5,3 m
Profondeur du lac (moy)	2,05 m
Volume du lac	125 x 10^3 m^3
Assise rocheuse	gneiss charnockitiques
Dépôts meubles	moraine de fond, till délavé
Epaisseur des dépôts	environ 4 m sur les pentes 15-20 m sous le lac
Type de sol	podzol ferro-humique orthique
Drainage	de bon à imparfait
Perméabilité (dépôts)	1,5 x 10^{-3} cm/s
Végétation	sapin baumier (Abies balsamea) épinette blanche (Picea glauca) bouleau (Betula papyrifera)
Macrophytes	Nuphar Eleocharis Carex Sagittaria
Faune ichtyologique	omble de fontaine (Salvelinus fontinalis)
Charge du lac	petits ruisseaux et résurgences; écoulement souterrain important
Décharge du lac	un ruisseau principal
Temps de renouvellement	environ 2 mois
Débit à l'exutoire (min)	< 0,001 m^3/s (9 JAN 85)
Débit à l'exutoire (max)	0,351 m^3/s (1 MAI 86)
Prise des glaces	mi-novembre
Départ des glaces	mi-mai
Précipitations annuelles	1,3 m

Données de la Forêt Montmorency

Température de l'air (max)	34°C
Température de l'air (min)	-41°C
Température de l'air (moy)	0,2°C
Période sans gel	135 jours

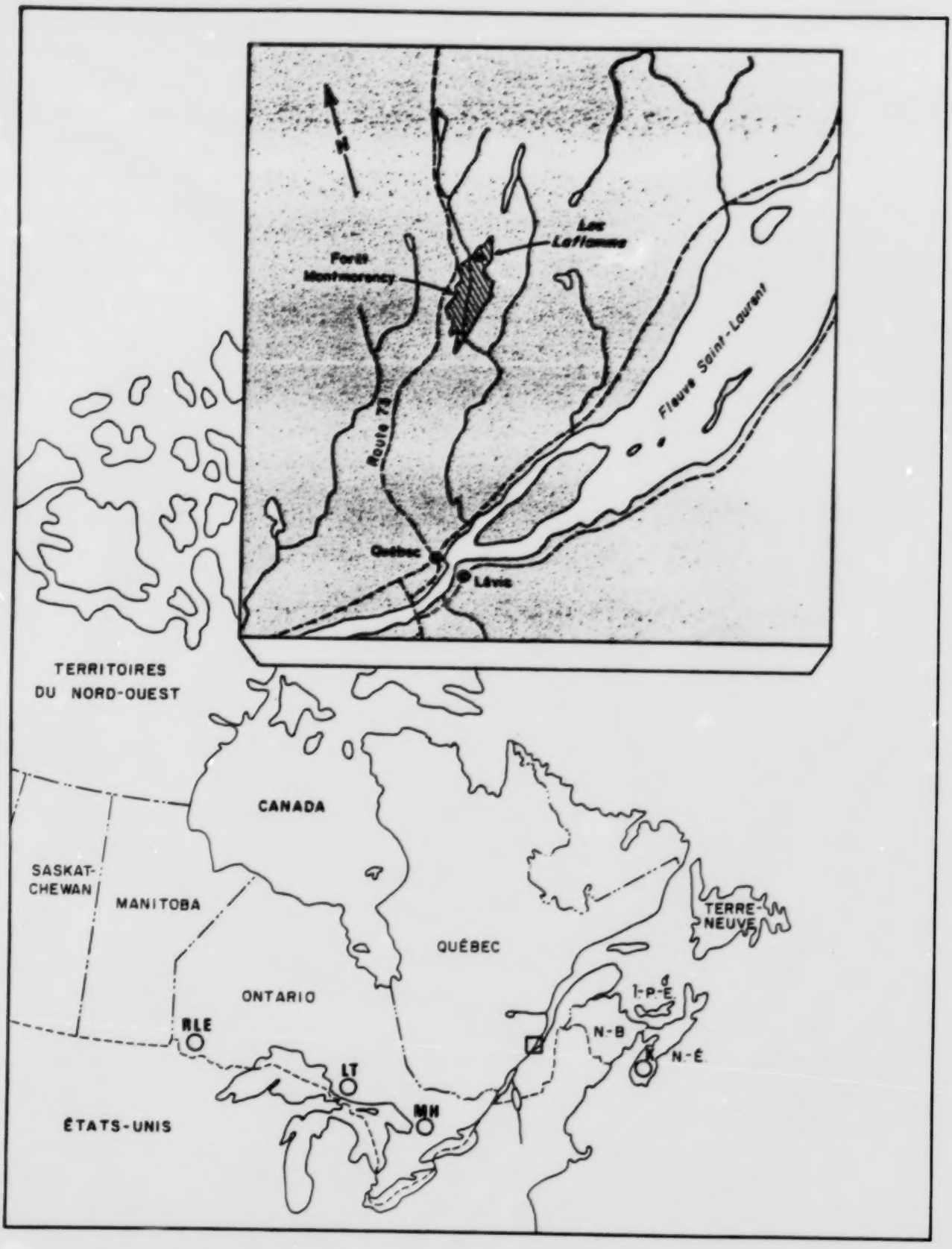


Figure 1: Localisation du bassin versant du lac Laflamme

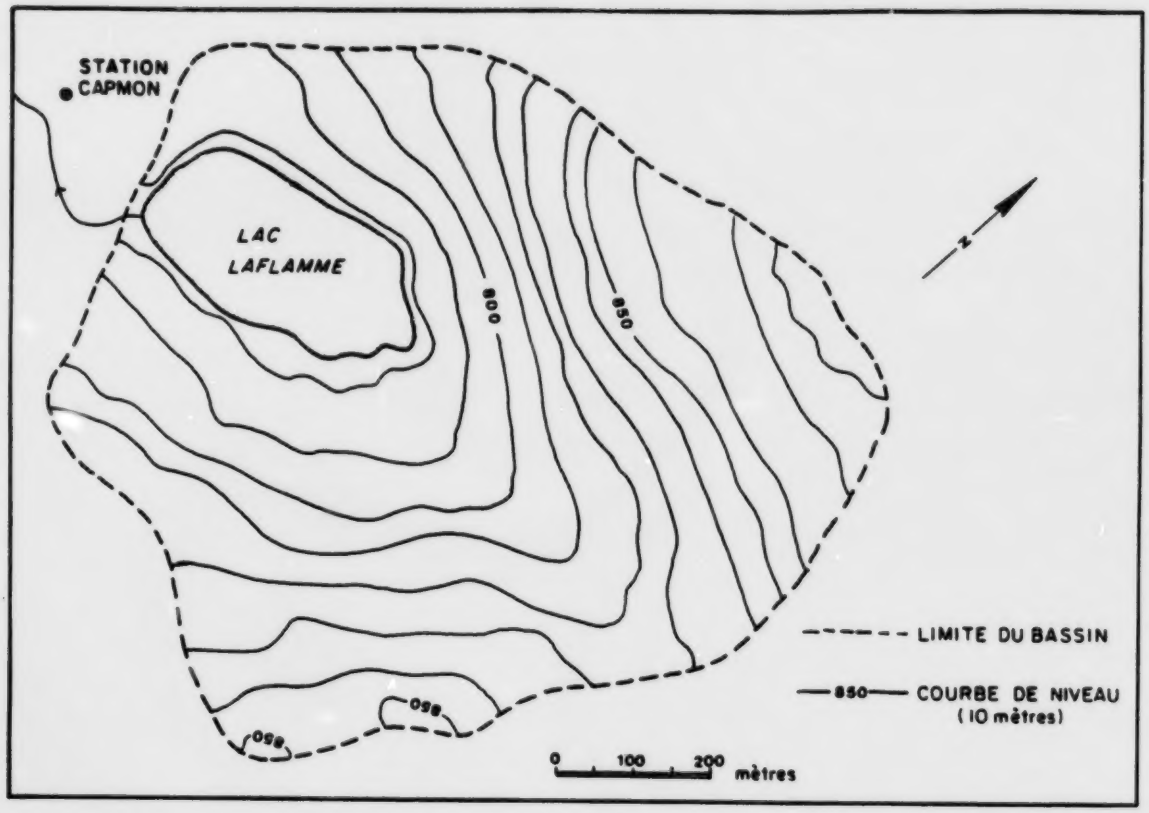


Figure 2: Topographie du bassin versant du Lac Laflamme

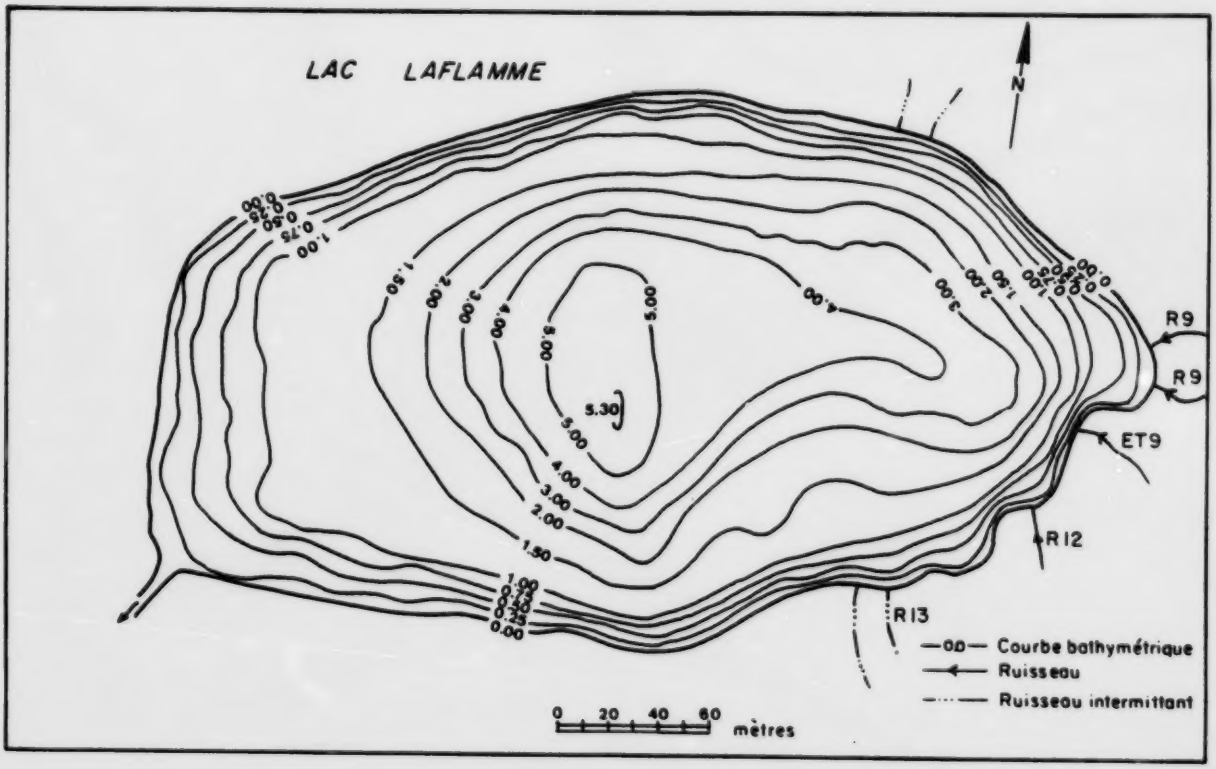


Figure 3: Bathymétrie du lac Laflamme

Les précipitations annuelles étaient en moyenne de 1,33 m de 1981 à 1988 dont 32% sous forme de neige. Une couverture de neige continue se développe chaque hiver jusqu'à une hauteur de 1,2 m et disparaît au mois de mai.

D'après les données de la station météorologique principale de la forêt Montmorency pour la période de 1966 à 1980, la température moyenne de juillet est de 14,8°C et celle de janvier est de -15,2°C. Le nombre annuel de jours de gel approche 230. La période de croissance s'étend généralement sur 144 jours de la mi-mai à la mi-octobre. Il y a en moyenne 1 763 heures d'ensoleillement par année. La vitesse moyenne du vent est de 7 km/hr.

1.3 Géologie

Le bassin versant est situé entièrement sur un très grand massif de gneiss charnockitique précambrien de la province géologique de Grenville. La roche charnockitique varie en composition du granite au gabbro mais la mangérite est le plus commun. La roche n'est pas fissurée, imperméable et s'altère peu. La composition minéralogique de la roche est surtout feldspathique avec un peu de quartz et de minéraux mafiques (Azzaria et al.,1982).

Les dépôts meubles sont un mélange de matériel d'origine locale et de matériel transporté du nord par les glaciers. Les dépôts meubles sont essentiellement des tills composés principalement de feldspaths potassiques, du quartz et des plagioclases. La fraction de silt et d'argile est faible, la moyenne étant de 10%. Le minéral prédominant dans la fraction argileuse est la kaolinite. Le till est composé de blocs et de galets dans une matrice de sable.

L'épaisseur du till dépasse 15 m dans une vallée souterraine sous le lac (Robitaille et al., 1983). L'épaisseur moyenne des dépôts dans la zone de recharge est de 4 m et elle diminue avec l'altitude jusqu'à environ 0,1 m. Peu d'affleurements rocheux sont présents dans le bassin. Les deux extrémités du lac sont occupées par des tourbières.

1.4 Sols

Les sols du bassin versant sont surtout des podzols ferro-humiques orthiques. Les sols bien drainés font partie des séries Laurentide et DesNeiges et les sols drainés modérément font partie des séries Piché et LaFoi. Les podzols humiques à gley sont de la série Coligan et ont un drainage pauvre. L'humus de type MOR a une épaisseur moyenne de 7,9 cm (Martel, 1981). Le sol a une texture grossière et a été classé comme un loam sablonneux (0-30 cm), un sable limoneux (30-90 cm) et un sable (90-120 cm) (Plamondon et al., 1983).

L'eau du sol est acide avec un pH variant de 3,8 dans l'horizon H à 4,6 dans l'horizon inférieur B (Boutin et Robitaille, 1987). Les taux d'azote dans le sol sont à plus de 1% à la surface et diminuent rapidement jusqu'à 0,2-0,3% à 10 et 15 cm et jusqu'à 0,15% à 40 et 50 cm. Des quantités détectables de soufre ont été trouvées seulement dans l'horizon LH (0,13%). Le niveau de base du sol minéral est de 0,03% de S. Il y a une strate avec des faibles niveaux de fer et d'aluminium à 10-15 cm sous la couche organique et une zone sombre immédiatement sous l'horizon Ae avec des niveaux élevés de ces deux même métaux (Rutherford et al., 1985).

1.5 Végétation

Le bassin versant est recouvert d'une forêt boréale

de conifères de la zone climacique de la sapinière à bouleau blanc. Les espèces dominantes incluent 90% de sapin baumier (Abies balsamea (L.) Mill), 5 % de bouleau blanc (Betula papyrifera, Marsh) et 5 % d'épinette blanche (Picea glauca, Moench). Sur les rives, la pessière tourbeuse à Ledum et l'aulnaie sont les associations végétales dominantes.

La couverture végétale actuelle est le résultat d'une reconstition naturelle après une coupe en 1943. Un petite zone du bassin a été coupée après 1980 à la suite de mortalité due à l'épidémie de tordeuse de bourgeon de l'épinette (Choristoneura fumiferana, Clem). L'épidémie a commencé au début des années 1970 et en 1982 la défoliation sur le versant nord du bassin était de 40 à 50 % (Prévost, 1983). En décembre 1983, un chablis important a renversé plusieurs arbres dans le bassin.

L'âge moyen des tiges est de 50 ans, la densité des tiges commerciales est de 4 800 tiges par hectare et le pourcentage de couverture est de 80 % (Prévost, 1983). Les arbustres bas incluent: Acer spicatum, Alnus rugosa, Myrica gale, Salix sp., Kalmia polyfolia, Cassandra cacyculata.

1.6 Réseau de drainage

Le réseau de drainage du bassin n'est pas très étendu. Les ruisseaux à l'amont du lac sont intermittents sauf pour le tributaire principal. L'exutoire est caratérisé par un écoulement permanent variant de 0,002 m^3/s, durant l'étiage d'hiver, à plus de 0,1 m^3/s en mai.

La contribution de l'eau souterraine à la recharge du lac est dominante durant la plus grande partie de l'année alors que l'écoulement de surface a de l'importance surtout au printemps.

Le drainage est bon dans les zones éloignées du lac mais devient pauvre sur la rive sud et dans les tourbières. Le temps de résidence de l'eau souterraine dans la zone de recharge près du socle rocheux est inférieur à 500 jours tandis que l'eau souterraine dans la zone de décharge possède des temps de résidence beaucoup plus long (Bernier et al., 1983).

Le lac lui-même a une forme ovale avec un périmètre de 1,02 km et une profondeur maximum de 5,3 m (figure 3). Le volume moyen du lac est de 125 x 10^3 m^3 et le temps de résidence est d'environ deux mois. Les macrophytes aquatiques tels que Nuphar, Carex, Eleocharis, Saggitaria occupent une bonne superficie du lac.

1.7 Qualité de l'eau

Les eaux du lac sont faiblement minéralisées et ont une teinte jaune avec une couleur moyenne de 24 unités. Le niveau de carbone organique dissous est d'environ 3,7 mg/l. La composition de l'eau du lac est dominée en terme d'équivalent par le calcium et les ions bicarbonates. Le lac est considéré comme très sensible à l'acidification, affecté par les dépositions atmosphériques mais peu acidifié (Papineau, 1983). Le pH moyen est de 6,4 toutefois durant la fonte printannière, des valeurs aussi basses que 4,3 ont été mesurées près des rives du lac. Le lac Laflamme est moins acide que la plupart des lacs de la Réserve faunique des Laurentides.

Le lac connaît deux périodes de brassage, une à l'automne avant la prise des glaces de la mi-novembre et une dès le départ des glaces à la mi-mai.

1.8 Population de poissons

Le lac soutient une population d'environ 2 000 ombles de fontaine (Salvelinus fontinalis) (Verreault et Langlois, 1984). Ces poissons croissent lentement à cause de la température froide de l'eau. Un poisson de deux ans a une longueur moyenne de 20 cm. Le frai a lieu de la mi-septembre à la mi-octobre, dans le lac lui-même, à moins de 20 m de la rive. En 1981, il y a eu une mortalité massive au début de juin qui a été attribuée au stress simultané des faibles taux d'oxygène dissous, d'une acidité élevée de l'eau et des fortes concentrations d'aluminium dans le lac.

1.9 Utilisation du territoire

Le bassin du lac Laflamme se situe sur un territoire à vocation forestière. Durant deux périodes, à la fin des années 1800 et en 1943, la forêt du bassin versant a été exploitée. La coupe à la fin des années 1800 était probablement sélective alors que la deuxième était intensive. Seulement trois zones du bassin n'ont pas été coupées en 1943 soit une petite section de la rive nord-ouest du lac, une zone humide située en contre-bas, au sud du lac, et une section inaccessible au nord-est du lac (Moyes, 1987).

En 1959-1960, le gouvernement provincial a loué le territoire de la Forêt Montmorency à l'Université Laval (bail de 99 ans) pour établir une station de foresterie expérimentale et un vaste immeuble et des routes forestières ont été construits. A la fin des années 1970, la pêche et la coupe furent interdites dans le bassin du lac Laflamme et des installations du programme TADPA y furent installées. Le lac Laflamme est présentement utilisé pour des travaux de recherche par Environnement Canada, Forêts Canada et les universités Laval, McGill et du Québec (INRS-eau, UQUAM) (annexe 1).

2. MÉTHODES

Le programme d'échantillonnage des principales composantes de l'étude du bilan ionique a commencé de façon routinière au début de 1981 (tableau 2). L'échantillonnage des précipitations est la responsabilité du Service de l'environnement atmosphérique (SEA) d'Environnement Canada. La direction des eaux intérieures (DEI) surveille la qualité et les niveaux d'eau du lac et de l'exutoire.

Plusieurs autres agences et contractants universitaires ont également des programmes d'échantillonnage dans le bassin reliés au programme TADPA. Lorsque leurs résultats sont cités dans ce rapport, les détails des méthodes analytiques se trouvent dans les références correspondantes.

Tableau 2. Programme d'échantillonnage et publication des données utilisées pour le bilan ionique.

Paramètre	Date initiale	Fréquence	Reférences
Précipitation	4 déc, 1980	Journalier	Barrie et al.,1982, 1984, Wiebe et al., 1985, Vet et al., 1986, 1988a, 1988b
Niveau du lac	6 déc, 1979	Continue	Canada, 1982 à 1988
Débit	6 nov, 1980	Continue	Canada, 1982 à 1988
Qualité (lac)	8 jan, 1981	Hebdomadaire	NAQUADAT et
Qualité (exu)	16 mars 1981	Hebdomadaire	Papineau, 1983 à 1985, 1987, 1988

2.1 Précipitations

La qualité de l'air et la qualité des précipitations sont mesurées sur une base quotidienne à la station Montmorency du réseau fédéral CAPMON/RCEPA (Réseau Canadien d'Échantillonnage des Précipitations et de l'Air). De décembre 1980 à juillet 1983, cette station appartenait au réseau APN (Air and Precipitation Network).

Les précipitations ont été récoltées dans un échantillonneur de précipitations humides de type Sangamo ayant des seaux noirs. Le volume des précipitations a été obtenu par un échantillonneur standard de pluie et de neige du Service canadien de météorologie. Les échantillons ont été mis en bouteille individuellement, conservés à 4°C sans préservatif et envoyés dans des récipients refroidis toutes les deux semaines au laboratoire national de qualité de l'eau à Burlington, Ontario. Les analyses du pH, des anions majeurs (SO_4, NO_3, Cl) et des cations majeurs (Ca, Mg, Na, K, NH_4) ont été effectués selon les méthodes décrites dans le tableau 3. Le phosphore total a été analysé en 1981 et 1982.

Les concentrations dans l'air ambiant de SO_4, SO_2 et NO_3 total ont été mesurées à une hauteur de 10 m en aspirant approximativement 30 m^3 d'air sur 24 heures à travers des filtres et en les extrayant avec de l'eau déionisée pour l'analyse.

2.2 Lac et exutoire

Des échantillons hebdomadaires ont été récoltés au centre du lac (intégré de 0 à 4 m) et à l'exutoire, gardés à 4°C et une partie des bouteilles était envoyée la journée même au laboratoire régional de Longueuil.

TABLEAU 3

Méthodes analytiques pour les précipitations et les eaux de surface

PARAMETRE	PRECIPITATION	LAC - EXUTOIRE ET No NAQUADAT
pH	Électrométrie	Électrométrie 10301L
Ca (mg/l)	Absorption atomique	Absorption atomique 20103L
Mg (mg/l)	Absorption atomique	Absorption atomique 12102L
Na (mg/l)	Photométrie par flamme	Absorption atomique 11105L
K (mg/l)	Photométrie par flamme	Absorption atomique 19102L
NH_4 (mgN/l)	Colorimétrie	Colorimétrie 7555P
SO_4 (mg/l)	Colorimétrie (APN)	Colorimétrie 16306L
	Chromatographie ionique	Chromatographie ionique 16309L
Cl (mg/l)	Colorimétrie (APN)	Colorimétrie 17203L
	Chromatographie ionique	
NO_3 (mgN/l)	Colorimétrie (APN)	Colorimétrie 7112L
	Chromatographie ionique	
P (mgP/l)	Autoclave,digestion (APN)	Digestion,colorimétrie 15406P

PARAMETRE	LAC - EXUTOIRE ET No NAQUADAT
Conductivité (μS/cm)	Électrométrie 2041L
Couleur (unité)	Comp. visuelle modifiée 2011L
Alcalinité totale (mg $CaCO_3$/l)	Titration H_2SO_4 10101L
Alcalinité Gran (mg $CaCO_3$/l)	Titration HCl 10110L
P inorganique (mgP/l)	Colorimétrie 15301P
Dureté (mg $CaCO_3$/l)	Titration 10603L
SiO_2 (mg SiO_2/l)	Colorimétrie 14102L
Cd (mg/l)	Absorption atomique 48002P
Cu (mg/l)	Absorption atomique 29005P
Ni (mg/l)	Absorption atomique 28002P
Zn (mg/l)	Absorption atomique 30005P
Pb (mg/l)	Absorption atomique 82002P
Hg (mg/l)	Absorption atomique 80011P
Al (mg/l)	Absorption atomique 13003P 13005P
Mn (mg/l)	Absorption atomique 25004P 25005P
Fe (mg/l)	Absorption atomique 26004P 26005P
Carbone organique dissous (mgC/l)	Infrarouge 6101L 6104L
Carbone inorganique dissous (mgC/l)	Infrarouge 6151L 6180L

Les échantillons ont été préservés avec de l'acide sulfurique dans le cas du phosphore et avec de l'acide nitrique pour les métaux traces. En 1983, l'analyse des métaux traces a été transférée du laboratoire régional au laboratoire national de Burlington et la fréquence d'envoi était alors de trois mois. Sur le terrain, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et la température ont été mesurés avec une sonde Hydrolab, à cinq profondeurs.

Les échantillons ont été analysés pour les cations majeurs (Ca, Mg, Na, K), les anions majeurs (SO_4, Cl, NO_3), la conductivité, le pH, l'alcalinité (Gran et totale), la couleur, le phosphore total et huit métaux traces (Al, Mn, Fe, Pb, Ni, Cu, Zn, Cd). A tous les deux mois, depuis mai 1985, des analyses de silice, d'ion ammonium, de sulfates par chromatographie, de carbone organique dissous (COD) et de carbone inorganique dissous (CID) ont été effectuées sur les échantillons du centre du lac. Les analyses de phosphore inorganique et de mercure ont été abondonnées après 1982 à cause de problèmes analytiques. Les détails des méthodes analytiques sont exposés dans le livre de référence NAQUADAT (National Water Quality Data Bank).

La validation des données est effectuée avec des calculs de balances ioniques (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+}, H^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{--}, Cl^{-}, NO_3^{-}), au moyen de la conductivité calculée et par l'identification des valeurs extrêmes. Les données ne sont pas corrigées pour la contribution des sels marins. Les numéros de stations pour l'archivage dans la banque NAQUADAT sont 01QU02PD0001 (lac) et 00QU02PD0001 (exutoire).

Le niveau du lac et le débit à l'exutoire ont été mesurés sur une base continue par des limnigraphes. Le seuil jaugeur a été réchauffé l'hiver pour prévenir le gel complet du ruisseau.

3. LES PRECIPITATIONS

3.1 Le volume des précipitations

Une des principales caractéristiques du bassin du lac Laflamme est la grande quantité de précipitations reçues durant l'année. Annuellement, on y compte près de 200 jours avec une forme ou une autre de précipitation.

Le volume annuel des précipitations durant les sept dernières années hydrologiques (1 juin au 31 mai) a varié entre 1,12 m en 1981-82 et 1,56 m en 1982-1983 (tableau 4, figure 4). En terme d'année civile, le plus fort volume a été enregistré en 1983 (1,6 m) et le plus faible en 1987 (1,1 m) (annexe 2). Les précipitations se subdivisent en pluie et en neige dans un rapport de deux à un. La couverture nivale a été particulièrement importante durant l'hiver 1984.

Tableau 4. Précipitations et écoulements annuels au lac Laflamme

Année	Précipitation cm	Neige cm	Écoulement cm
1981-1982	112,3	40	70,6
1982-1983	156,1	37	98,5
1983-1984	129,8	49	85,7
1984-1985	121,2	43	74,0
1985-1986	134,0	49	95,3
1986-1987	130,3	37	89,4
1987-1988	124,9	48	70,2
Moyenne	129,8	43	83,4

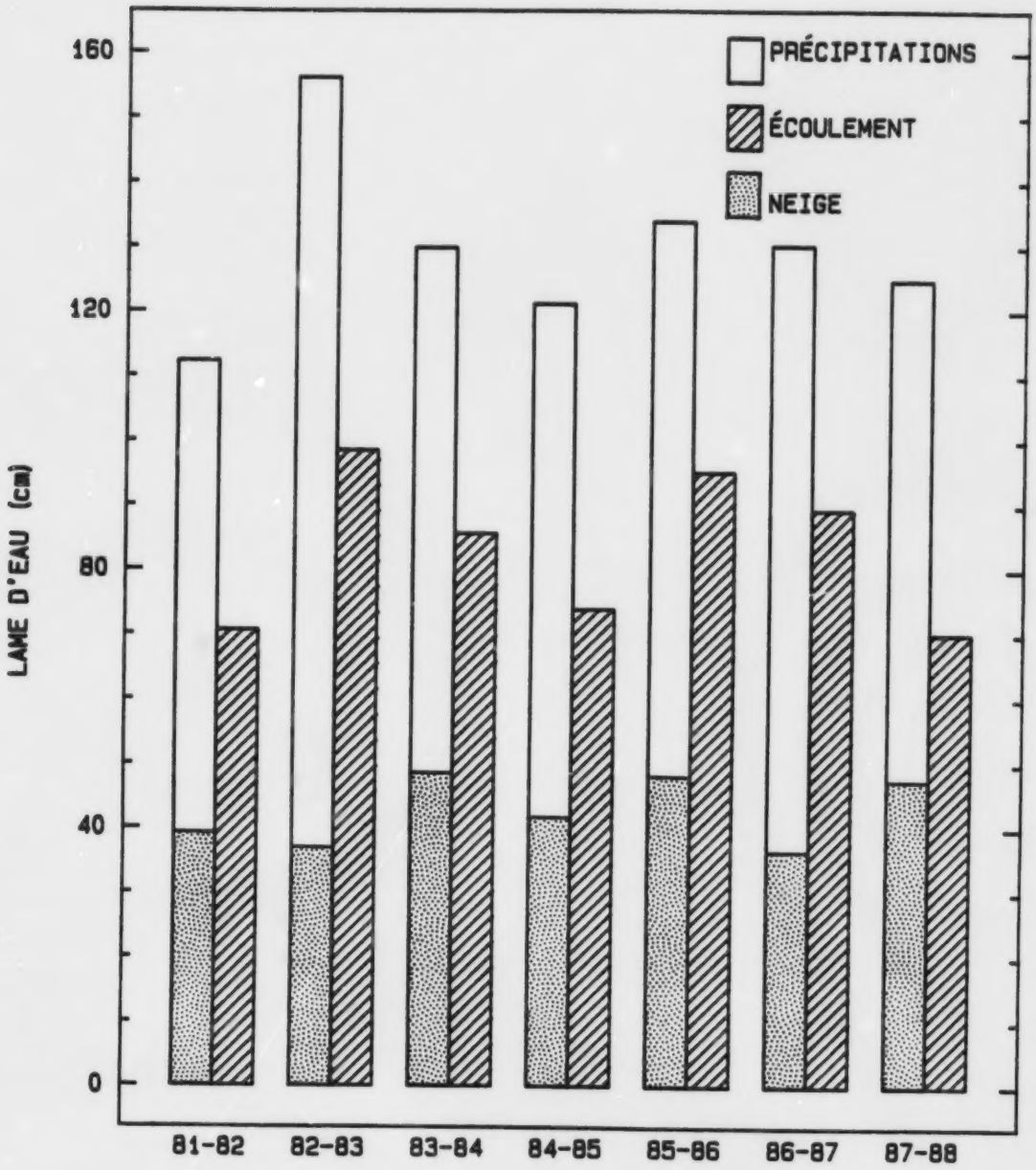


Figure 4: Précipitations et écoulements par année hydrologique au lac Laflamme

Sur une base mensuelle, une moyenne de 11 cm de précipitation arrive sur le bassin (figure 5, annexe 2). Le mois le plus sec a été celui de février 1987 (8,1 mm) et le plus humide celui de mai 1983 (235,4 mm). Des périodes de précipitations importantes ont eu lieu en février 1981, novembre et décembre 1982, avril et mai 1983, de mai à août 1986 et de septembre à novembre 1988.

A l'échelle journalière, le volume de précipitation reçu par le bassin varie de 0,1 mm à 93,4 mm (81-2-1). Dans une année, il y a entre deux à sept événements de plus de 35 mm. Egalement, les événements de 10 mm et plus soit 20,6% du nombre d'événement sont responsables de 67% du volume des précipitations annuelles. Prévost (1983) rapporte que l'intensité des événements demeure sous 2,5 $mm.h^{-1}$ et sous 5,0 $mm.h^{-1}$ durant respectivement 83 et 95 % du temps.

3.2 Concentrations des ions

La qualité de la pluie ou de la neige peut varier considérablement d'un événement à l'autre. Les facteurs qui contribuent à cette variation de la qualité comprennent le type, l'intensité, la quantité et la durée des précipitations ainsi que les conditions antécédentes, la qualité de l'air, les paramètres météorologiques et l'origine des masses d'air.

Les données journalières de qualité des précipitations et de l'air de la station RCEPA/CAPMoN ont été publiées dans Barrie et al. (1982, 1984), Wiebe et al., (1985) et Vet et al., (1986, 1988a, 1988b).

3.2.1 pH

De 1981 à 1987, le pH des précipitations arrivant

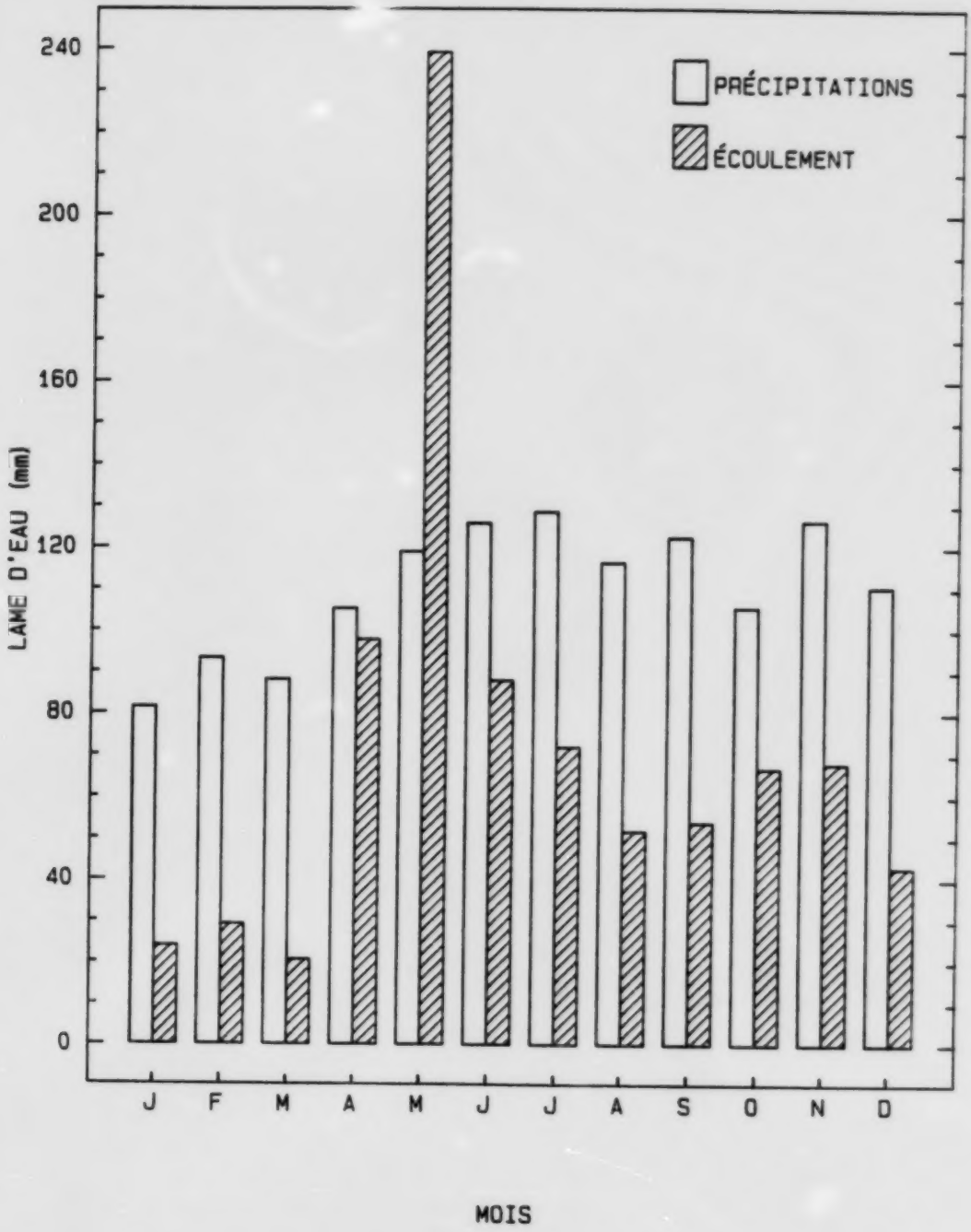


Figure 5: Précipitations et écoulements mensuels moyens au lac Laflamme (1981-1988)

au bassin variait de 3,4 à 6,8 (figure 6). La moyenne pondérée du pH a été de 4,4. Près de 12% des événements avaient des pH inférieurs ou égaux à 4,0. On considère qu'un événement ayant un pH sous 4,2 est fortement acide tandis qu'un événement est modérément acide lorsque le pH se situe entre 4,2 et 4,6.

Le pH moyen annuel a varié de 4,33 en 1985 à 4,56 en 1981 (tableau 5). Le pH mensuel le plus bas a été mesuré en avril 1985 soit de 3,9. Même si l'acidité décroît en général avec le volume des précipitations, il y a toutefois un bon nombre d'événements chaque année qui contribuent fortement à la charge atmosphérique et au volume des précipitations. Ainsi en 1985, dix événements de forte charge ont contribués à 40% des apports atmosphériques annuels et à 17 % du volume. Le pH moyen de ces événements était de 4,0. Selon une étude de Desautels (1985), le pH varie aussi selon la provenance des masses d'air (tableau 6).

A l'échelle provinciale, le pH des précipitations est mesuré par le réseau REPQ (Réseau d'Échantillonnage des Précipitations du Québec). Les valeurs obtenues en 1986 sont présentée dans la figure 7 (Jacques et Boulet, 1988). On note un gradient d'ouest en est allant de 4,2 à 5,0. La médiane est de 4,4. L'acidité des précipitations de la forêt Montmorency en 1986 (pH=4,5) se trouve vers le milieu de cette gamme.

Dans les autres stations canadiennes du RCEPA/ CAPMoN, la gamme des pH est sensiblement la même que pour le Québec (figure 8). Le pH moyen le plus faible de 1987 a été mesuré à la frontière de l'Ontario et du Québec (pH=4,22) et le pH moyen le plus élevé dans les Prairies (pH=5,1).

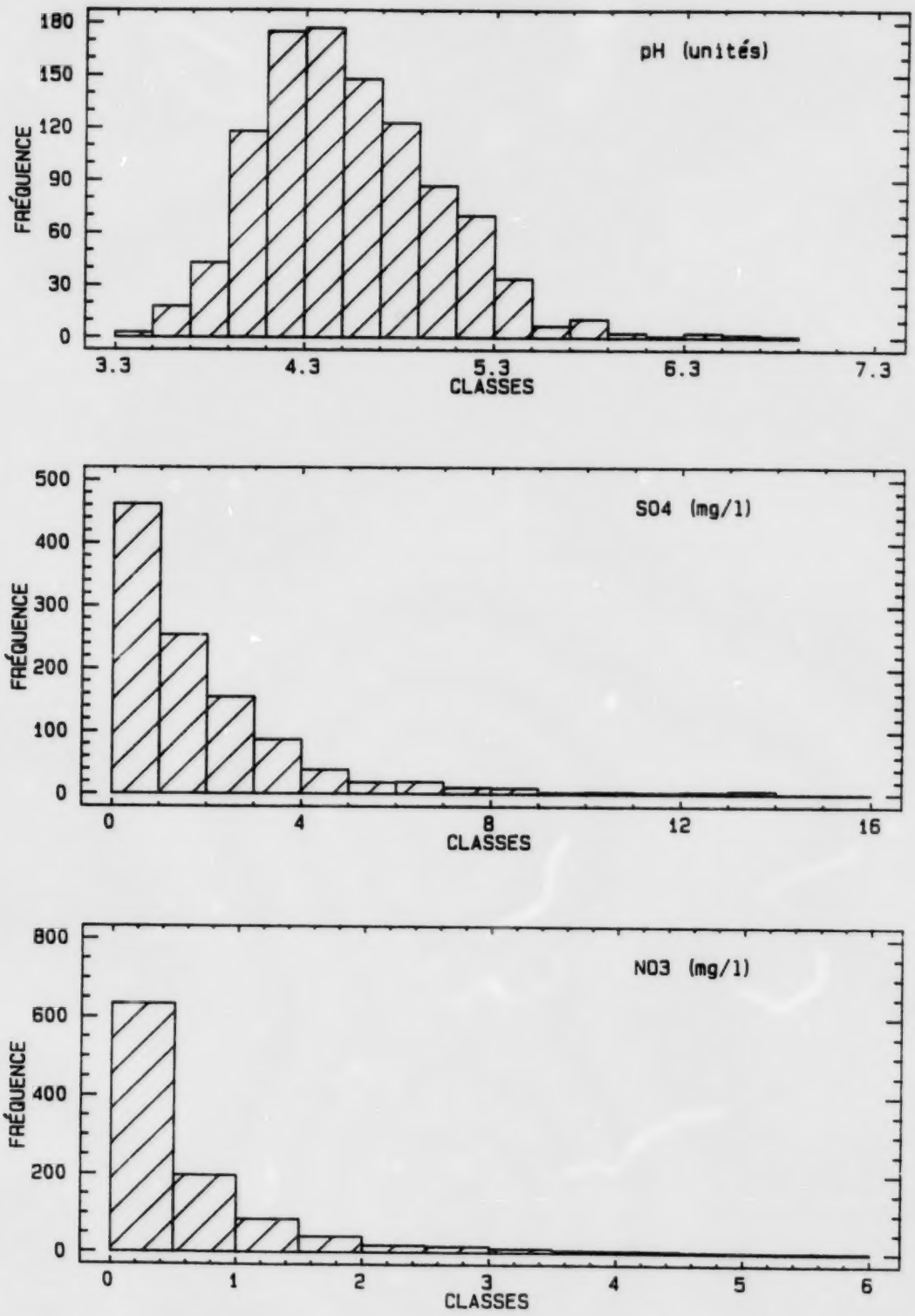


Figure 6: Histogrammes des pH, des sulfates et des nitrates dans les précipitations

TABLEAU 5

Moyennes annuelles pondérées des paramètres dans les précipitations

An	pH	H µg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	NH_4 mgN/l	SO_4 mg/l	Cl mg/l	NO_3 mgN/l
81	4,56	27,6	0,09	0,01	0,08	0,02	0,13	1,44	0,08	0,20
82	4,38	41,5	0,07	0,01	0,08	0,02	0,15	1,77	0,17	0,26
83	4,51	31,1	0,11	0,02	0,06	0,02	0,16	1,40	0,16	0,19
84	4,35	44,2	0,16	0,02	0,03	0,03	0,20	2,06	0,29	0,30
85	4,33	46,5	0,09	0,02	0,03	0,02	0,18	1,75	0,10	0,31
86	4,48	33,1	0,05	0,01	0,02	0,01	0,14	1,15	0,06	0,22
87	4,48	33,2	0,06	0,01	0,03	0,02	0,17	1,44	0,05	0,25
MOY	4,44	36,8	0,09	0,01	0,05	0,02	0,16	1,54	0,13	0,25

TABLEAU 6

Le pH des précipitations selon la provenance des masses d'air. Décembre 1983 à Novembre 1984 (Desautels, 1985)

Provenance	Nombre	Volume (mm)	pH
Mid-Ouest	38	253	4,05
Sud de l'Ontario	15	107	4,29
Nord de l'Ontario	13	91	4,69
Nord du Québec	18	84	4,95
Maritimes	10	112	5,08
Nouvelle-Angleterre	12	169	4,58
Côte est des Etats-Unis	10	152	4,52

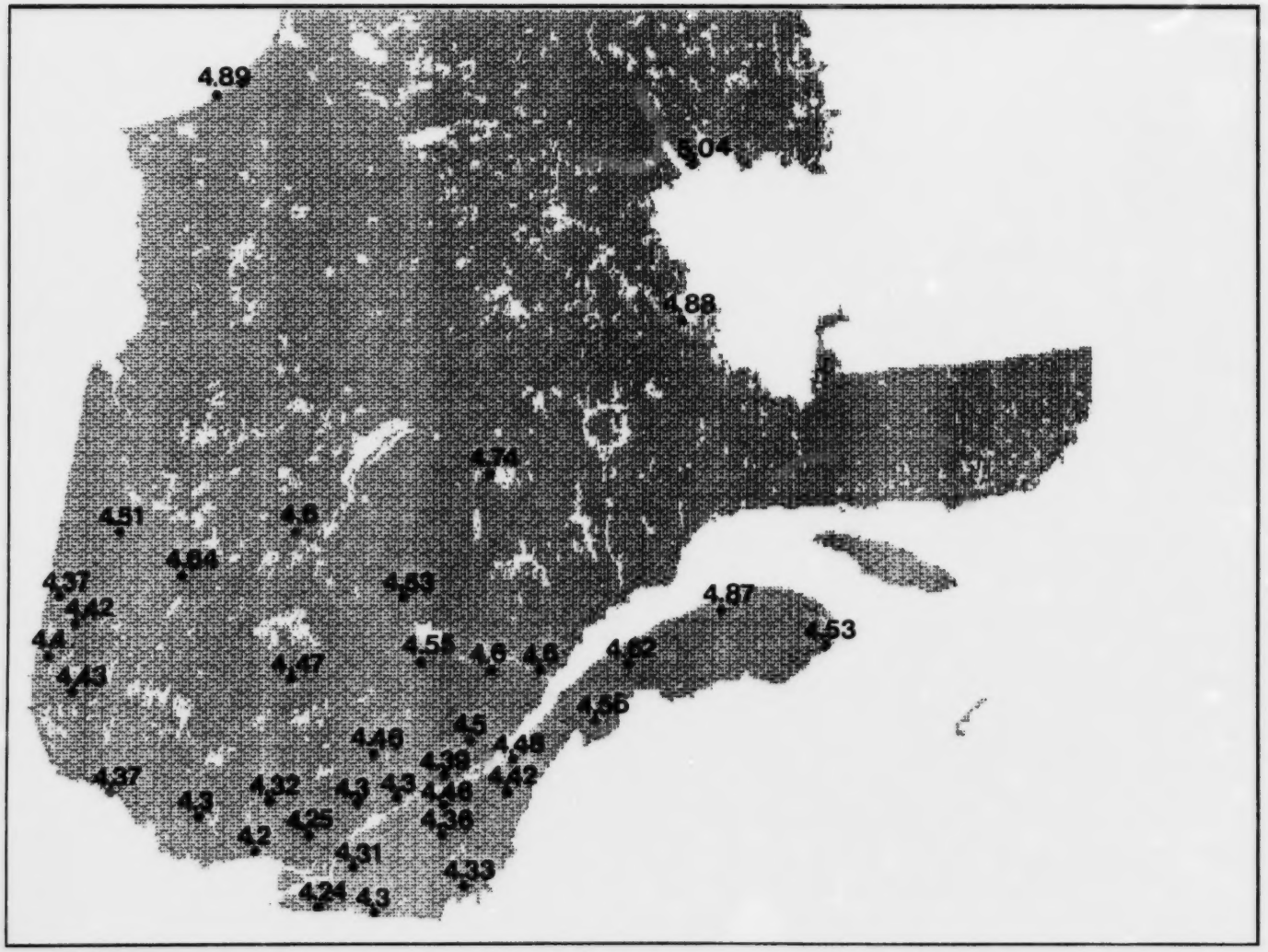


Figure 7: pH annuel des précipitations des stations du REPQ en 1986

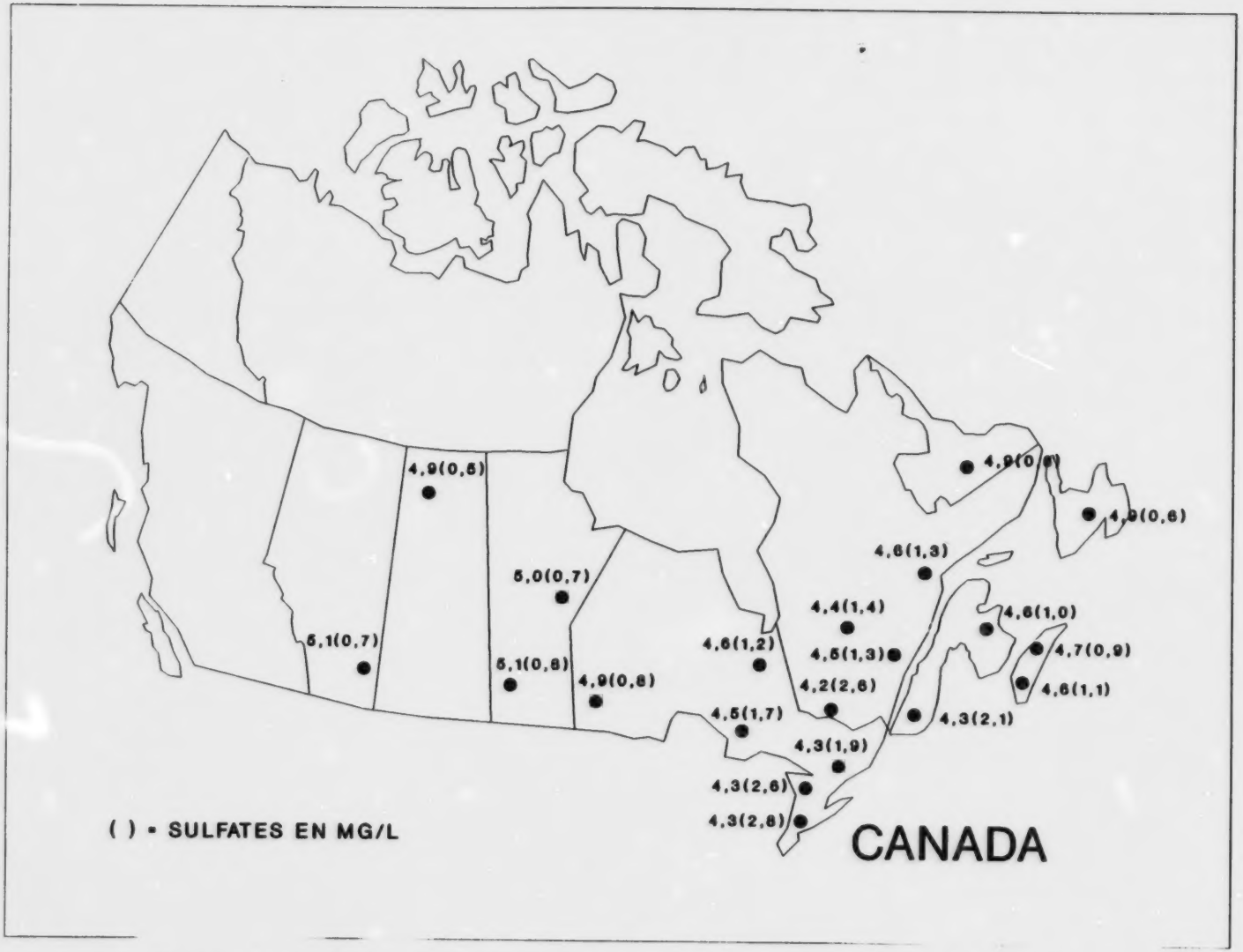


Figure 8: pH et concentrations des sulfates dans les précipitations des stations du RCEPA en 1987

3.2.2 Autres composantes

En plus des ions d'hydrogène, plusieurs autres composantes se retrouvent dans la fraction humide des précipitations tels les sulfates (1,5 mg/l), les nitrates (0,25 mgN/l), l'ion ammonium (0,16 mg/l), le calcium, le sodium, les chlorures et de petites quantités de magnésium et de potassium (figure 9). Les moyennes annuelles pondérées sont données au tableau 5. Les concentrations de phosphore se situent principalement entre 0,001 et 0,005 mg/l.

Les précipitations qui arrivent au bassin sont donc essentiellement une solution diluée de 110 µeq/l d'acide sulfurique et d'acide nitrique. La majorité des valeurs journalières de sulfates se situe entre la limite de détection et 9 mg/l (figure 6). Dans le cas des nitrates la plupart des valeurs sont sous 4 mgN/l. La moyenne annuelle la plus élevée pour les sulfates a été mesurée en 1984 (2,1 mg/l ou 43 µeq/l) tandis que celle pour les nitrates l'a été en 1985 (0,31 mgN/l ou 22 µeq/l) (figure 10).

En terme d'équivalent, généralement les sulfates et les ions hydrogène sont les ions dominants dans une précipitation mais durant l'hiver, surtout au mois de janvier, les valeurs de nitrates peuvent égaler ou dépasser celles des sulfates.

Des analyses de corrélation ont été effectuées sur les moyennes mensuelles des composants majeurs. Le coefficient de corrélation entre l'ion hydrogène et les sulfates est plus élevé (r=0,74) que celui entre l'ion hydrogène et les nitrates (r=0,52). Il y a une bonne corrélation entre les sulfates et l'ion ammonium (r=0,76).

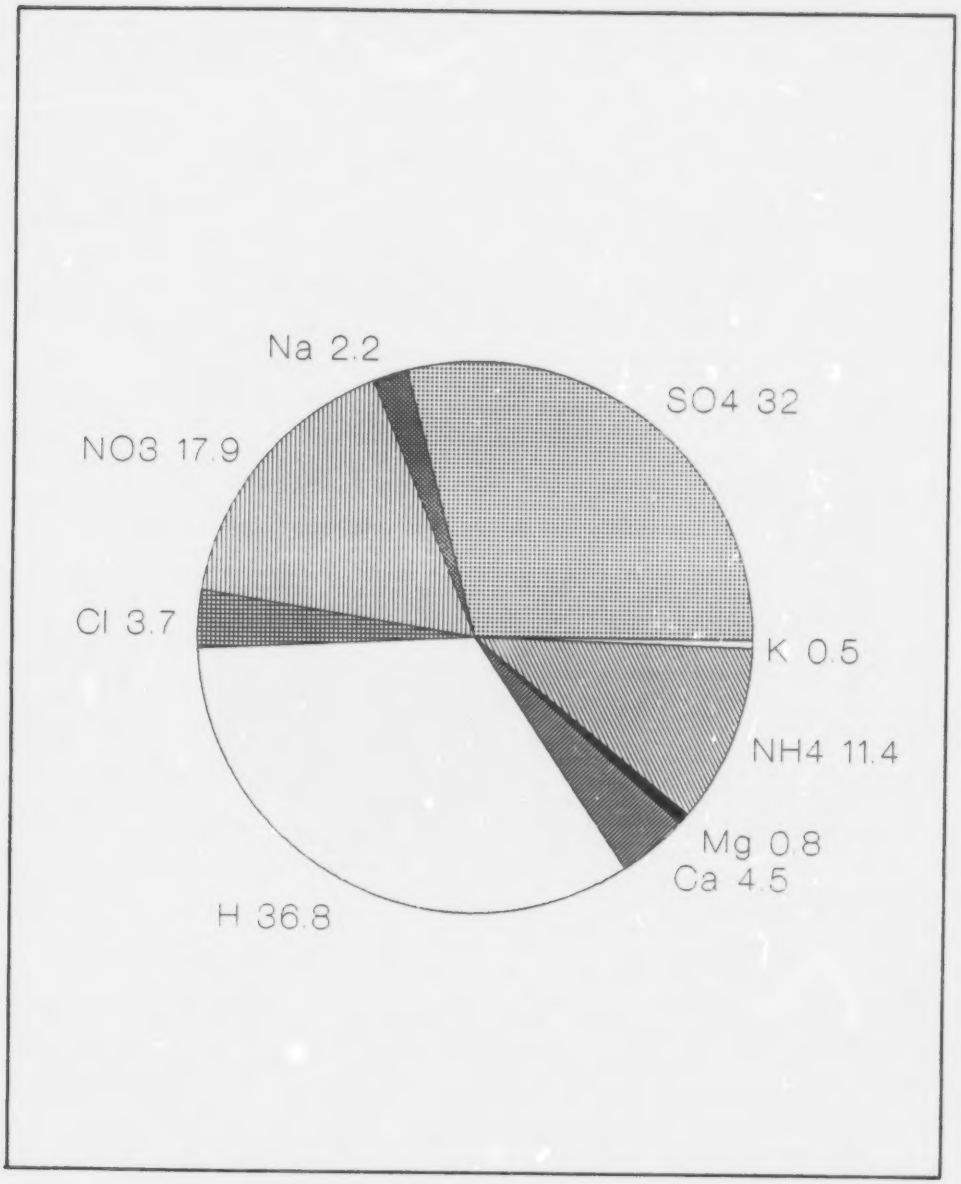


Figure 9: Composition des précipitations au lac Laflamme (µeq/l)

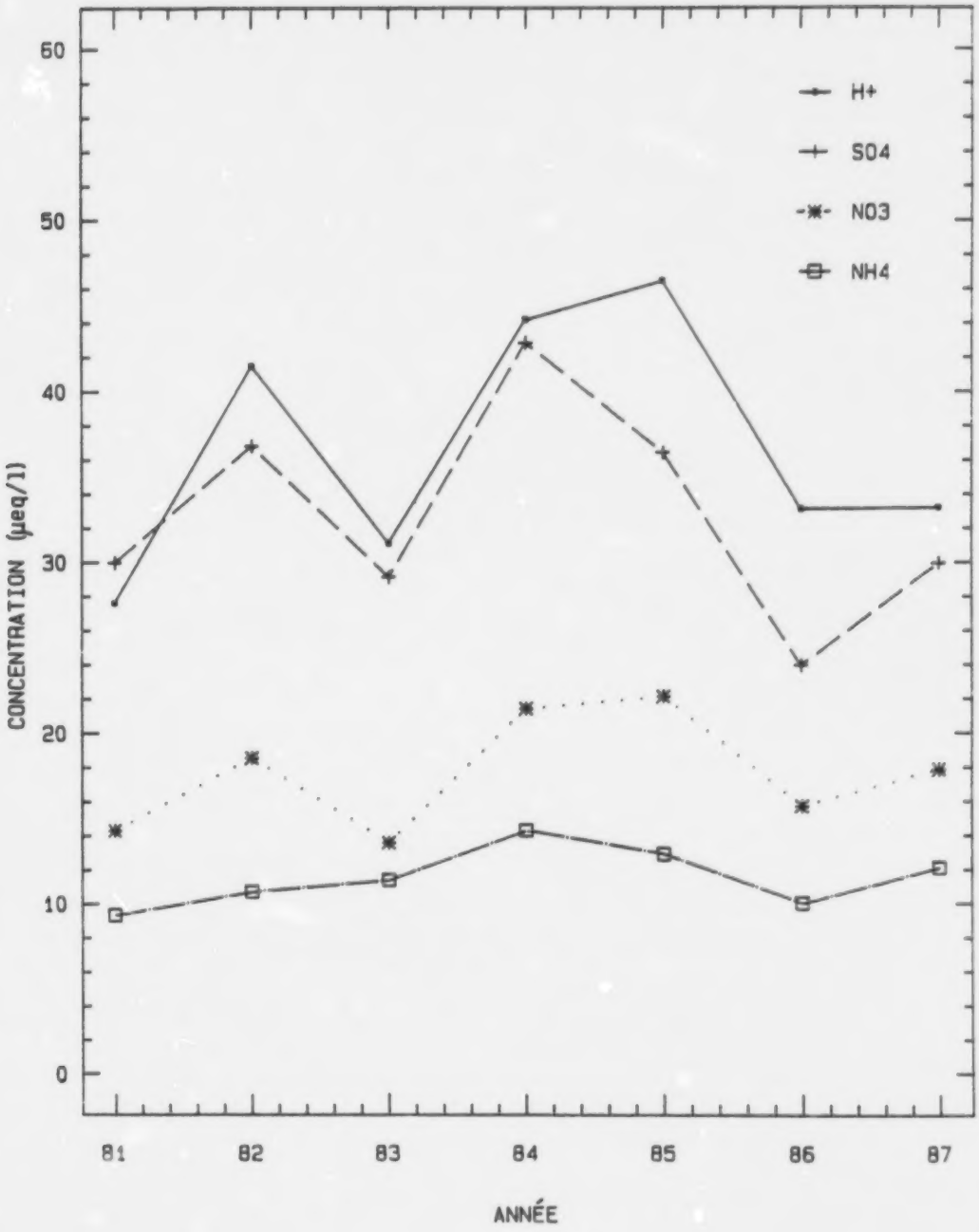


Figure 10: Variations annuelles des concentrations de l'ion hydrogène, des sulfates, des nitrates et de l'ion ammonium dans les précipitations (1981-1987)

Matrice de corrélation des concentrations mensuelles

	H	SO4	NO3
SO4	0,74		
NO3	0,52	0,20	
NH4	0,48	0,76	0,37

Les séries des concentrations de sulfates, de nitrates et de l'ion ammonium démontrent de la saisonnalité (tableau 7). En général, les concentrations de sulfates et de l'ion hydrogène sont plus élevées au printemps et à l'été que durant les mois froids (figure 11). Aux printemps de 1982 et de 1985, les valeurs des sulfates (2,9 et 3,5 mg/l) et de l'ion hydrogène (75 et 84 µg/l) étaient très élevées. Contrairement aux sulfates, les concentrations de nitrates sont généralement plus basses l'été que l'hiver ou vers la fin de l'automne. Le cycle saisonnier de l'ion ammonium ressemble à celui des sulfates.

3.2.3 Tendances temporelles des ions majeurs

Les tendances temporelles des séries de concentrations se divisent en deux périodes (figure 12). De 1981 à 1985, il semble y avoir une légère tendance à la hausse des concentrations mensuelles des composantes majeures dans les précipitations. Par après, il semble y avoir des baisses.

L'étude de régression indique qu'il y a eu des augmentations des concentrations des quatres ions majeurs (SO_4, NO_3, NH_4, H) de 1981 à 1985. Cependant, seule l'augmentation de l'ion hydrogène est statistiquement significative. Les tests non paramétriques confirment la

TABLEAU 7

Moyennes saisonnières des composantes principales des précipitations

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Hiver							
H (µg/l)	19,77	43,93	19,00	48,48	43,57	33,17	24,92
SO4 (mg/l)	0,86	1,36	0,56	1,58	0,93	1,05	0,71
NO3 (mgN/l)	0,23	0,36	0,15	0,47	0,39	0,33	0,20
Printemps							
H (µg/l)	29,84	75,04	35,18	32,90	83,96	34,99	43,79
SO4 (mg/l)	1,83	2,93	1,46	1,95	3,49	1,29	2,50
NO3 (mgN/l)	0,27	0,31	0,17	0,20	0,44	0,17	0,32
Été							
H (µg/l)	28,69	29,94	48,92	47,96	38,80	31,46	34,63
SO4 (mg/l)	1,59	1,68	2,57	2,62	1,93	1,23	1,74
NO3 (mgN/l)	0,14	0,19	0,22	0,23	0,23	0,14	0,17
Automne							
H (µg/l)	33,41*	40,02	25,29	45,41	33,22	33,90	31,61
SO4 (mg/l)	1,54	1,69	1,25	1,86	1,04	1,05	1,13
NO3 (mgN/l)	0,23	0,27	0,21	0,35	0,26	0,26	0,30

Hiver: janvier à mars
Printemps: avril, mai
Été: juin à août
Automne: septembre à décembre
* septembre à novembre

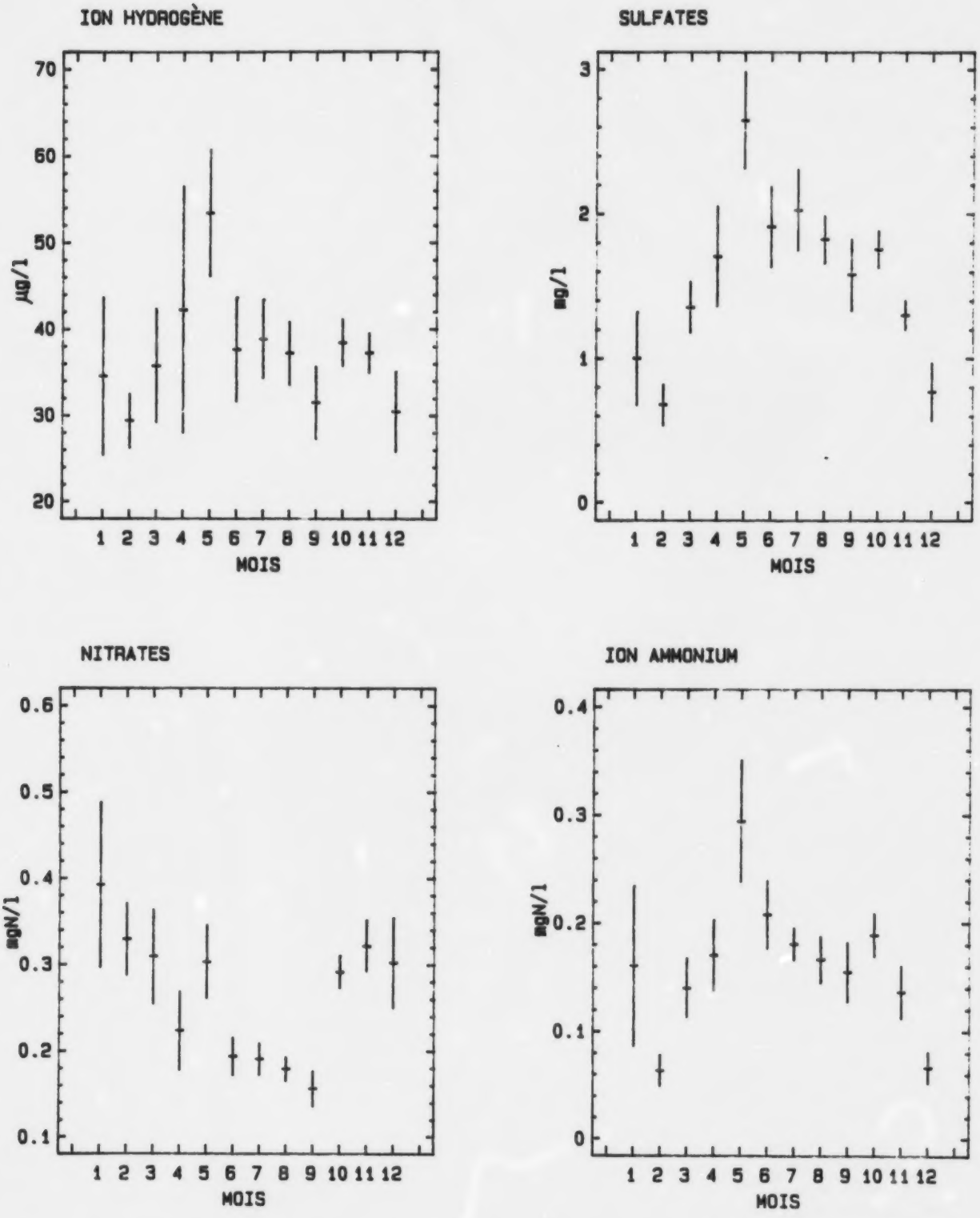


Figure 11: Saisonnalité des concentrations de l'ion hydrogène, des sulfates, des nitrates et de l'ion ammonium dans les précipitations

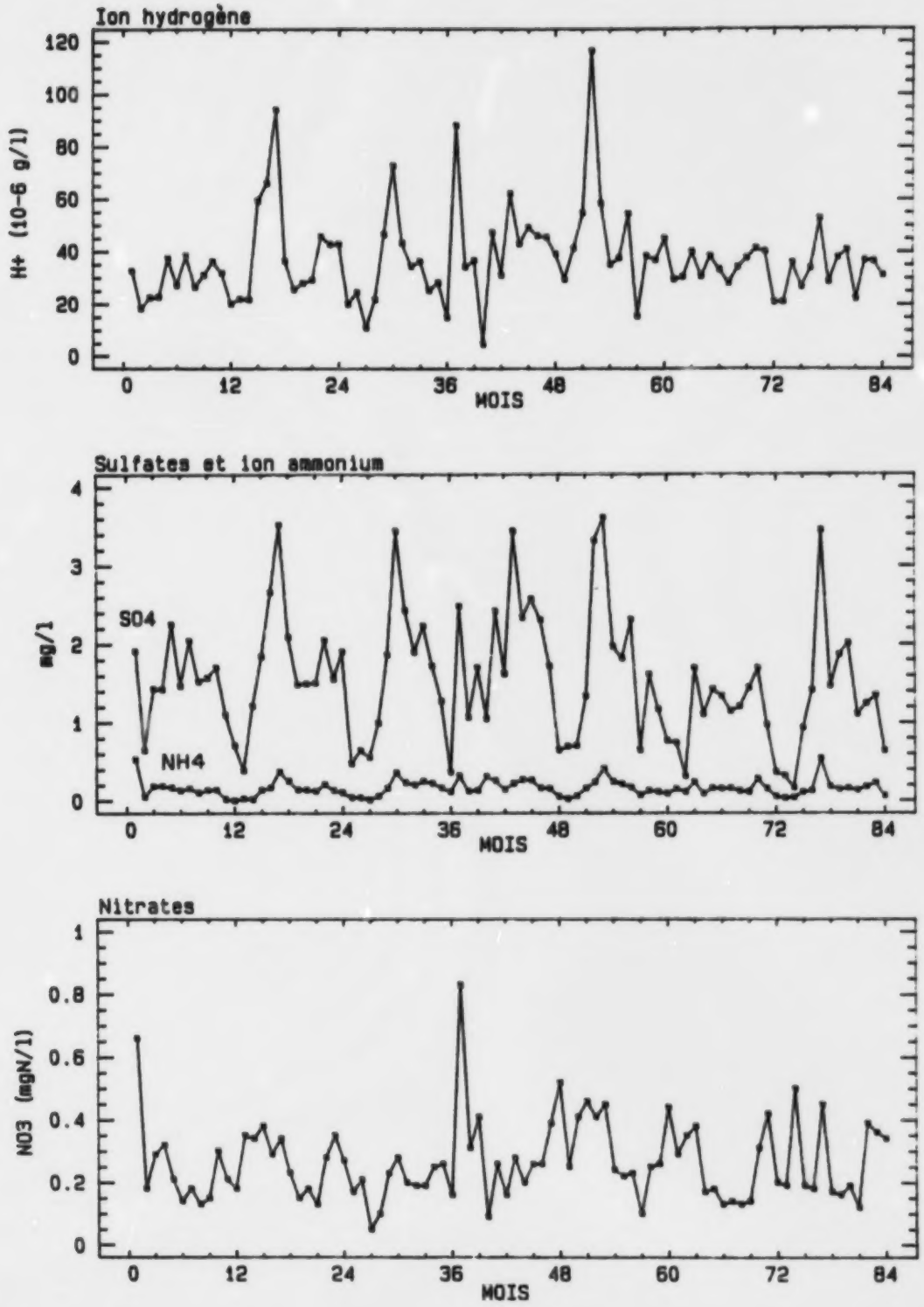


Figure 12: Variations temporelles de l'ion hydrogène, des sulfates, des nitrates et de l'ion ammonium dans les précipitations

tendance croissante de l'ion hydrogène (pH de 4,55 à 4,37) et des nitrates (0,24 à 0,30 mgN/l).

Les tendances ont commencé à se renverser entre mai et août 1985. Les concentrations de sulfates dans les précipitations deviennent même plus basses que les niveaux de départ de 1981, dès février 1986. L'ion ammonium a également un coefficient de régression négatif à la fin de 1986.

La diminution des concentrations de sulfates en 1985 a aussi été noté par le REPQ. A la station Forêt Montmorency, la concentration des sulfates est passée de 52,7 µeq/l en août à 17,9 µeq/l en septembre 1985. De plus, les moyennes annuelles de sulfates (de 40 à 29 µeq/l), de nitrates (de 28 à 19 µeq/l) et de l'ion ammonium (de 13 à 11 µeq/l) ont diminuée entre 1985 et 1986 et le pH annuel a augmenté (pH 4,34 à 4,50) (Jacques et Grimard, 1987; Jacques et Boulet, 1988).

La résultante de ces deux tendances inverses est que les tests non paramétriques ne détectent aucune tendance croissante ou décroissante dans les concentrations des ions majeurs pour l'ensemble de la période de 1981 à 1987.

Tendance temporelles dans les concentrations

Paramètres	Test	1981-1985	1981-1987
pH	Kendall	Diminution	Non
NO_3	Kendall Sais.	Augmentation	Non
SO_4, NH_4	Kendall Sais.	Non	Non
Volume	Kendall	Non	Non

4. LE BASSIN VERSANT

Un bassin versant peut être divisé en un réseau de compartiments: atmosphère, voûte forestière, couvert de neige, végétation, horizons de sols, nappe souterraine, ruisseau et lac. Chaque compartiment peut affecter le régime hydrique et la composition chimique de l'eau par des processus biologiques ou chimiques.

4.1 La voûte forestière

La forêt n'est pas un réceptacle passif des précipitations brutes. Elle influence le volume ainsi que la déposition ionique reçus par le sol.

L'influence du couvert forestier sur le bilan d'eau a été étudiée durant les étés de 1981 et 1982. Plamondon (1982) a évalué que les précipitations brutes étaient homogènes sur le bassin et représentaient 0,97 fois les précipitations enregistrées à la station RCEPA. Plamondon et Prévost (1982) ont également évalué que l'interception par le couvert forestier totalisait 32 % des précipitations brutes. Les précipitations en sous-bois représentaient 66 % des précipitations brutes alors que l'écoulement le long des fûts était faible soit de 1 à 3 %.

Par des processus tels que le lessivage et la dissolution des particules et des aérosols sur la végétation (dépôts secs), les réactions chimiques en phase liquide, le lessivage des tissus végétaux et l'assimilation biologique, la qualité de l'eau est altérée par la forêt. En général, le contact avec des conifères enrichit les précipitations en cations de base, sauf l'ion ammonium, et en anions acides mais procure peu de neutralisation.

Dans le bassin du lac Laflamme, Robitaille et al. (1989) ont en effet noté que seulement les concentrations des nitrates et l'ion ammonium diminuaient dans les pluies en sous-bois et ils reliaient cette baisse à l'assimilation biologique. L'ion ammonium serait enlevé par les aiguilles, les lichens et les brindilles et les nitrates seraient assimilés par les lichens épiphytiques.

Les augmentations des concentrations de potassium, calcium et magnésium seraient reliées à l'excrétion foliaire des aiguilles et des pertes des lichens. Les augmentations de sulfates, sodium et chlorures pourraient provenir des apports par déposition sèche. Les acides organiques contribueraient à augmenter les concentrations de l'ion hydrogène. La qualité des précipitations en sous-bois pour l'été 1982 est donnée au tableau 8 et aux figures 13 et 14.

Les augmentations dans les concentrations des éléments chimiques, surtout le potassium et le manganèse, étaient encore plus importantes dans l'écoulement le long des fûts que dans les pluies en sous-bois. Cependant la contribution de l'écoulement le long des fûts à la charge ionique totale au lac est petite (tableau 9).

Les bilans ioniques après le passage dans le couvert forestier pour six étés ont été calculés par Robitaille et al. (1989). Il y a augmentation des charges de potassium, calcium, magnésium et phosphore et diminution des charges de l'ion hydrogène, des nitrates, de l'ion ammonium et du sodium, chaque été. Dans le cas des sulfates et des chlorures, la direction du changement variait d'une année à l'autre.

TABLEAU 8

CONCENTRATIONS (µeq/l) DES PARAMETRES DANS LES COMPARTIMENTS DU BASSIN VERSANT

	RCEPA	NEIGE[1]	EAU DE FONTE[2]	RUIS. HYPO.[2]	SOUS-BOIS[3]	FUTS[3]	SOL[3]	PIEZO 1 m[4]	PIEZO 4 m[4]	PIEZO 13 m[4]	RUISSEAU[5]	LAC	EXUTOIRE
	81-87	28-1-84	Prin 85	Prin 85	Été 82	Été 82	Été 82	Aut 82	Aut 82	Aut 82	Prin 83	81-88	82-88
pH	4,44	4,4	4,59	4,56	4,40	4,14	4,87	4,8	5,8	6,5	5,7	6,4	6,4
H	36,3	43	26	27,8	39,8	72,4	13,5	15,8	1,6	0,3	2,0	0,60	0,59
Ca	4,5	<1	10,9	75,1	24,9	113,8	122,4	111	158	320	101	120,5	112,9
Mg	0,8	0,2	2,8	18,1	10,7	37,7	28,7	29	56	246	25	43,6	40,0
Na	2,2	2	3,0	23,6	13,0	16,2	30,9	35	88	124	32	40,7	38,2
K	0,5	--	5,0	11,9	19,8	148,5	7,1	6	9	13	11	5,5	5,1
NH4	11,4	6	7,1	0,8	T	2,0	0,4	--	--	--	1	2,1	---
TOTAL CATIONS	55,9	51,2	54,8	157,3	108,2	390,6	203,0	196,8	312,6	703,3	172	212,9	196,8
SO4	32,0	19	19,8	103,6	73,6	198,4	111,3	110	67	60	73	87,0	89,5
Cl	3,7	3	5,2	9,3	17,4	24,6	21,3	17	17	17	8	11,5	10,8
NO3	17,9	36	19,3	48,1	0,2	1,5	171,2	56	14	16	30	7,0	6,6
HCO3	---	--	--	0,9	---	---	---	5	168	577	43	108,0	94,8
PO4	---	--	2,2	3,2	7,8	133,5	0,1	--	--	--	--	--	---
TOTAL ANIONS	53,6	58	46,5	165,1	99,0	358,0	303,9	188,0	266,0	670	154	213,5	201,7
TOTAL	109,5	109,2	101,3	322,4	207,2	748,6	506,9	384,8	578,6	1373	326	426,4	398,5

1. Jones et Bougie (1984)
2. Jones et al. (1986): du 25 avril au 29 mai 1985
3. Robitaille (1983): de juin à octobre 1982
4. Bernier et al. (1983): du 10 août au 6 octobre 1982
5. Jones et al. (1984): du 15 mars au 30 mai 1983

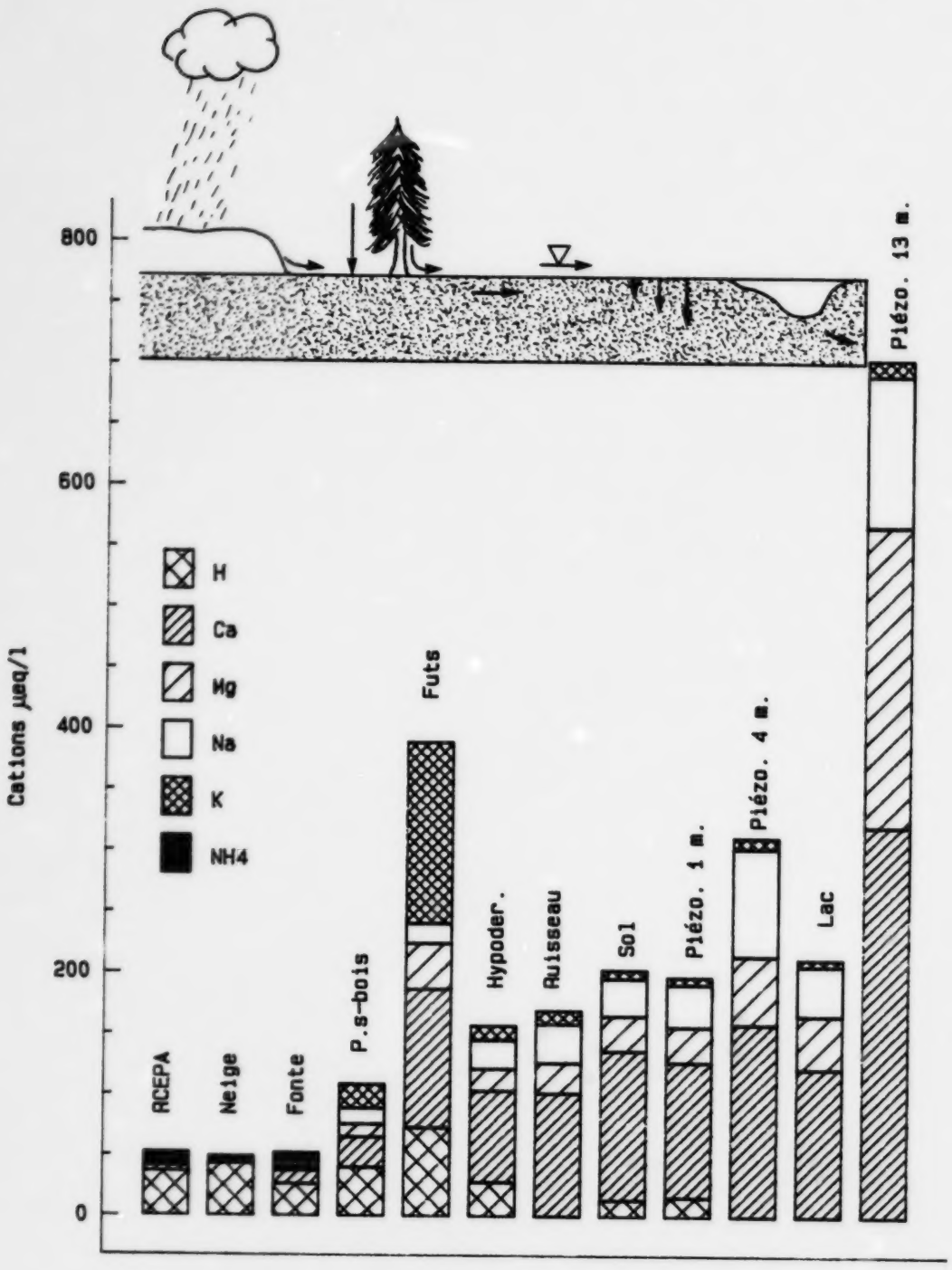


Figure 13: Modifications des cations lors du passage dans le bassin versant du lac Laflamme

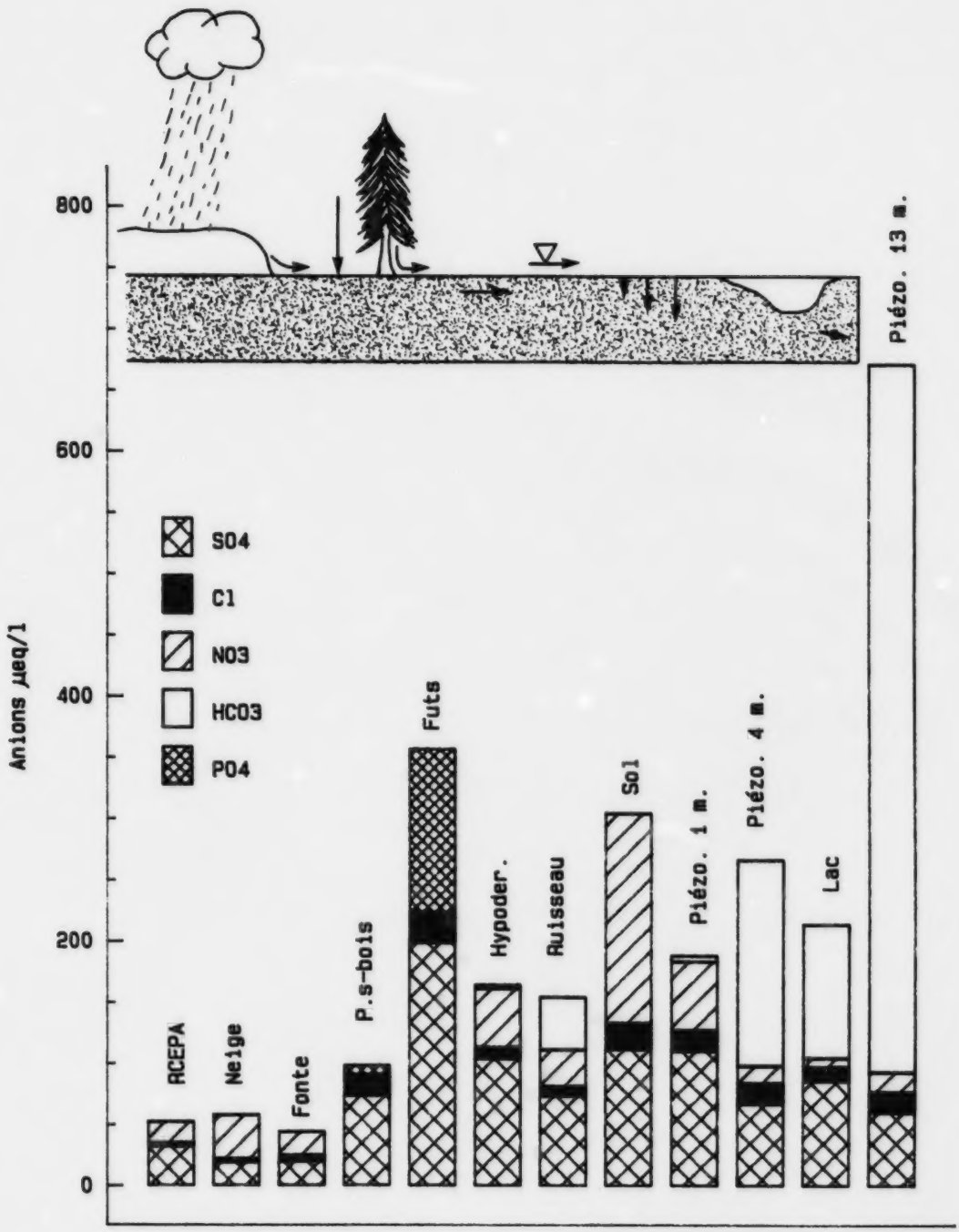


Figure 14: Modifications des anions lors du passage dans le bassin versant du lac Laflamme

Tableau 9. Les charges ioniques du couvert forestier
Mai à octobre 1982 (kg/ha)

Paramètres	Apports APN	Brute[1]	Sous[1] bois	Fût[1]	Total	Exutoire
SO_4	9,83	15,1	26,19	0,93	27,12	15,68
K	0,11	0,18	3,83	0,54	4,37	1,18
Cl	0,75	2,98	2,42	0,08	2,50	1,96
Ca	0,45	0,79	2,07	0,27	2,34	9,54
Na	0,37	1,46	1,09	0,04	1,13	3,34
Mg	0,05	0,12	0,55	0,49	1,04	1,78
PO_4	----	0,27	1,58	0,47	2,05	----
H	0,20	0,24	0,157	0,007	0,164	0,009
NO_3	1,07	2,49	0,08	0,009	0,089	0,73
NH_4	0,98	T	T	0,007	0,007	---

1. Robitaille et al. (1989)

4.2 Le couvert de neige

Durant l'hiver, le couvert forestier influence également le volume et la qualité des précipitations. Les différences importantes avec la saison chaude sont la diminution de l'évaporation, évaluée à environ $0,25x10^5m^3$ durant l'hiver et un ralentissement de l'activité biologique.

L'hiver, la neige est redistribuée par les têtes de conifères lorsqu'elle tombe à travers la forêt. De plus les conifères provoquent de l'hétérogénéité physique dans le couvert de neige à cause des zones d'égouttement.

Des corrélations significatives ont été trouvées par Jones (1987) entre la hauteur et l'équivalent en eau du couvert de neige et certaines caractéristiques biophysiques des conifères (porosité du couvert, aire des bois mous). La redistribution par le vent est réduite sous le couvert forestier par rapport aux aires découvertes et il y a aussi une diminution de la fonte par rayonnement solaire à cause de l'ombre produite par les têtes de conifères.

Du côté qualitatif, les augmentations dans les concentrations des éléments (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4) en passant à travers la voûte forestière sont généralement plus faibles l'hiver que l'été. Il n'y a pas de diminution des concentrations des nitrates et de l'ion ammonium. Ces ions demeurent donc au même niveau dans le couvert que dans les précipitations.

La qualité de la neige fraîchement tombée au sol est donc semblable à celle des précipitations brutes. La composition du couvert de neige du bassin du lac Laflamme pour le 28 janvier 1984 est donnée au tableau 8 (Jones et Bougie, 1984). L'acidité du couvert de neige est surtout attribuable aux ions d'acides forts d'origine atmosphérique.

Une fois au sol, le couvert de neige passera à travers plusieurs types de changement dans sa structure et dans sa composition. Le contenu ionique du couvert de neige, à une période donnée, sera la résultante des ajouts par déposition sèche et humide, des transformations dans le couvert de neige et des pertes dans les eaux de fonte.

Lors du séjour de la neige au sol, Jones (1987) a trouvé que l'influence de la forêt sur la qualité de la neige pouvait être considérable à cause de l'apport de débris

organiques forestiers. Les débris organiques qui sont déposés en grande quantité (154 g/m^2) sur le couvert de neige agissent comme substrat à l'activité microbiologique qui conduit à la perte dans le couvert de neige des éléments nutritifs (NO_3, NH_4^+), au lessivage des cations de base (Ca, Mg) et des bases organiques et la réduction des concentrations de l'ion hydrogène lorsqu'il y a de l'eau libre dans le couvert de neige.

Jones a également mis en évidence des processus de migration sélective des ions dans le couvert de neige, de dégradation et de lessivage de la matière organique à l'interface sol/neige ou neige/air et d'échange ionique entre les particules de matière organique et les eaux de fonte.

En 1983 et 1985, la composition chimique du couvert avant la fonte principale était semblable soit de 28 µeq/l H^+, de 20 µeq/l SO_4 et de 23 µeq/l NO_3. Au printemps, il y aura une redistribution et des transformations des ions dans le couvert de neige causées par les eaux de fonte et la pluie et l'hétérogénéité de la composition du couvert de neige augmentera.

Les bilans ioniques pour le couvert de neige avant les fontes de 1983 et 1985 sont donnés au tableau 10. Toutefois, la totalité des polluants acides accumulés dans le couvert de neige ne sera pas nécessairement déchargée sans modification aux autres réservoirs du bassin par les eaux de fonte.

4.3 La fonte de la neige

La fonte printannière est une période où les apports d'eau et d'éléments chimiques au lac sont importants.

Tableau 10. Les charges ioniques du couvert de neige avant la fonte (Jones, 1987)

	1983		1985	
	meq/m^2	(kg/ha)	meq/m^2	(kg/ha)
H^+	6,13	(0,06)	8,65	(0,09)
SO_4	4,30	(2,07)	6,10	(2,93)
NO_3	4,35	(0,61)	7,72	(1,08)
Cl	1,74	(0,62)	0,95	(0,34)
$NH4^+$	0,69	(0,12)	2,23	(0,40)
Ca	0,63	(0,13)	2,60	(0,52)
K	0,94	(0,37)	1,73	(0,67)
Mg	0,26	(0,03)	1,01	(0,12)
Na	0,36	(0,08)	0,67	(0,15)

Le régime hydrique change et il y a des variations importantes dans la qualité de l'eau du lac et de l'exutoire. Les effets principaux des eaux de fonte sur la chimie des eaux réceptrices comportent deux volets. Selon les conditions de la fonte, il peut y avoir une diminution importante du pH et de l'alcalinité et des concentrations croissantes des nitrates et de l'ion ammonium suivant l'apport d'eau acide concentrée de la première période de fonte. D'autre part, pour les ions présents en plus faible concentration dans la neige que dans les eaux de surface, une dilution est susceptible d'avoir lieu.

La période de fonte au lac Laflammme est rarement continue mais est souvent entrecoupée de périodes de gel. Généralement, elle débute à la fin mars et ne s'étend pas au-delà de la fin mai.

L'eau et les polluants chimiques sont transportés aux autres réservoirs du bassin (sol, nappe souterraine, ruisseau, lac) par les eaux de fonte. Le transport de l'eau et la qualité de celle-ci dans les différents réservoirs du bassin ont été étudiés durant quelques printemps.

4.3.1 Qualité des apports au lac durant la fonte

Un résumé de la qualité des apports d'eau au lac durant la fonte est donné à la figure 15. L'eau de fonte est généralement acide. Sa qualité est fortement influencée par la qualité de la neige accumulée et les facteurs physiques influençant la fonte: température de l'air, radiation solaire, structure de la neige et particulièrement les événements de pluie. Lors des événements de pluie ou de fonte intense lorsque des quantités élevée d'eau se retrouvent dans le couvert de neige, les différents cheminements des eaux de fonte dans le couvert causent des taux différents de lessivage et de transport des espèces ioniques de la neige.

Généralement, les premières eaux de fonte ont une concentration supérieure en composantes dissoutes que celle du couvert de neige. Les eaux de la fonte massive et des débits de pointe sont beaucoup plus diluées. Ce rejet préférentiel des eaux de fonte très concentrées au début de la fonte a été observé par Bédard (1984) et Jones et al. (1986). Par exemple, du 24 avril au 2 mai 1983, le taux de perte de l'ion hydrogène du couvert de neige était de 0,65 meq/m2/j tandis que les pertes n'étaient que de 0,1 meq/m2/j du 2 au 12 mai 1983.

Bien que la concentration des ions majeurs diminue dans l'eau de fonte au fur et à mesure que la fonte progresse, il peut y avoir des augmentations importantes dans

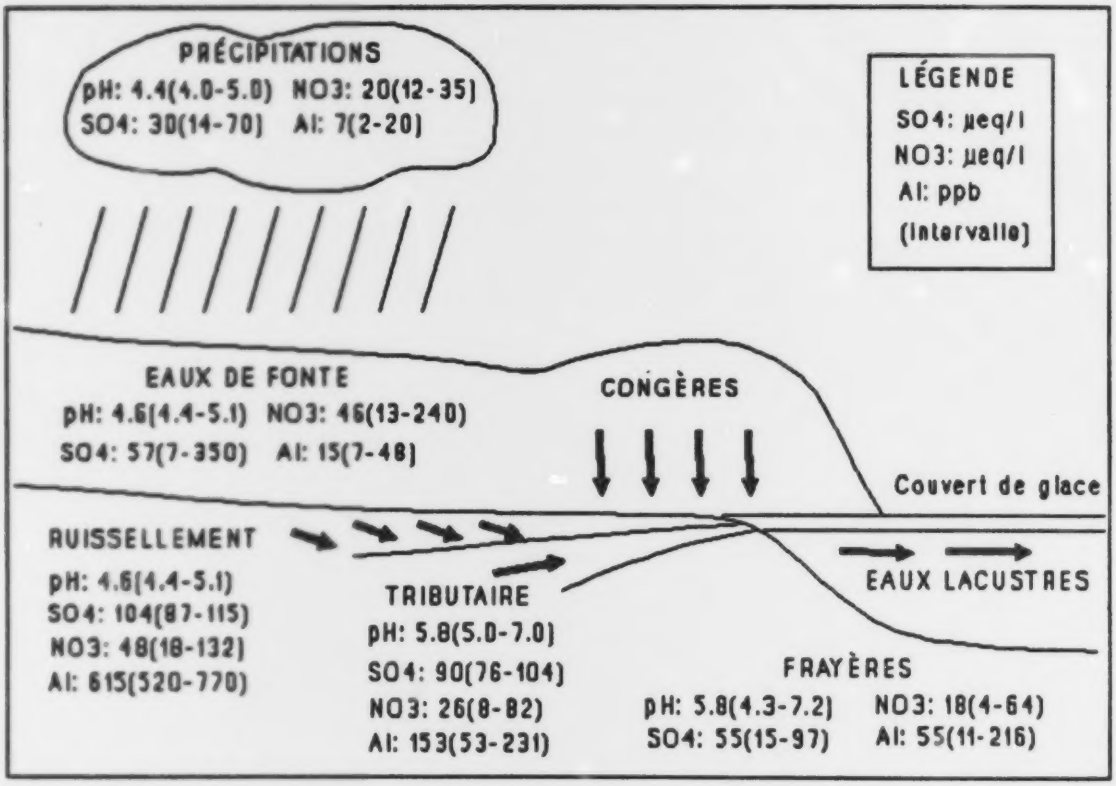


Figure 15: Évolution de la qualité de l'eau durant la fonte printannière (1983, 1985) (de Charette et al., 1989)

les concentrations après une pluie ou une période de gel ou lorsque le taux d'écoulement diminue, augmentant ainsi le temps de contact des eaux de fonte avec la neige.

Un modèle de simulation de la qualité des eaux de fonte a été développé au lac Laflamme, SNOQUAL1 (Stein et al., 1986; Jones et al., 1986). Plusieurs modèles hydrologiques de fonte ont également été ajustés au bassin (Roberge, 1987; Barry, 1988; Prévost, 1988).

L'eau de ruissellement hypodermique a des concentrations plus fortes de cations majeurs, de sulfates, de nitrates et particulièrement plus fortes d'aluminium que l'eau de fonte ou le couvert de neige (tableau 8, figure 15). La concentration d'ion ammonium diminue toutefois dans ce type d'eau ce qui a été attribué à la transformation ou l'assimilation par des processus biologiques (Jones et al., 1984).

Les concentrations de sulfates et de nitrates dans les eaux de ruisellement et dans l'eau du sol sont élevées au début de la fonte. Il y a une diminution rapide des nitrates par la suite causée par les changements dans la qualité des eaux d'infiltration et par l'assimilation végétale et microbiologique. La présence ou l'absence d'activité biologique dans le sol semble être un facteur explicatif important dans la détermination des niveaux de nitrates. Bien qu'il y ait une dilution initiale des sulfates lorsque les taux d'infiltration augmente, la concentration de sulfates dans l'eau du sol et l'eau de ruisellement demeure relativement stable à 100 µeq/l. Le sol, probablement l'horizon LFH, semble donc être une source de sulfates (Hendershot et al., 1986).

Thomassin et Jones (1987) ont trouvé en effet que la percolation à travers la couche organique, seulement, modifiait considérablement la qualité de l'eau. Les eaux de percolation contenaient moins de nitrates et plus de sulfates, d'ion ammonium, de potassium, de sodium, de magnésium, de calcium, d'aluminium, de manganèse et de fer que les eaux de fonte. Dans le cas de l'acidité, le sol organique avait un rôle neutralisant durant la première fonte et par la suite, son influence était de plus en plus acidifiante. Au début de la fonte de 1985, le pH des eaux de percolation (4,32 à 4,52) était plus élevé que le pH des eaux de fonte (4,24 à 4,42). Durant la seconde partie, le pH des eaux de percolation (4,35 à 4,65) était plus faible que celui des eaux de fonte (4,53 à 4,9).

Dans le cas des tributaires (ET9, R9, R12,R13), la composition de l'eau avant la fonte était semblable à celle du lac et de l'exutoire (tableau 8) et semblait contrôlée par l'eau souterraine. Au printemps, la qualité de l'eau est plutôt un mélange changeant des eaux de fonte, des eaux de ruissellement hypodermique et des eaux souterraines.

L'acidité semble augmenter avec le débit et le pH peut tomber de 7 à moins de 5. Les concentrations de sulfates dans les eaux des ruisseaux démontrent également peu de variabilité temporelle tout comme les eaux du sol et les eaux de ruisellement. Les concentrations d'aluminium sont moins élevées que celles du ruissellement hypodermique. En 1985, Campbell et al. (1986) ont trouvé une bonne relation entre les variations du pH, de l'aluminium et du COD dans le tributaire. En 1985, l'aluminium avait augmenté de 50 à 250 µg/l, le pH avait diminué 6,8 à 5 et le DOC avait doublé de 3 à 6 mg/l.

La qualité des eaux souterraines bien qu'affectée par les eaux de fonte, l'est moins que les autres types d'apports. Les piézomètres de pente se caractérisaient lors de la fonte de 1983 par des pH moyens de 5 à 5,4 , des concentrations de sulfates de 50 à 100 µeq/l et de nitrates de 5 à 41 µeq/l (Padilla et al. ,1983). Aucune baisse soudaine du pH ou de l'alcalinité n'a été observée dans les piézomètres peu profonds bien qu'une acidification des eaux souterraines était attendue. Une explication possible était que le gel du sol aurait empêché, cette année là, l'infiltration des premières eaux de fonte généralement les plus acides. L'eau souterraine plus profonde a généralement un pouvoir tampon plus élevé que celui de l'eau dans les piézomètres de pente.

4.3.2 Cheminements des eaux de fonte

L'hiver, les apports d'eau au lac sont faibles et proviennent de la nappe souterraine. Au printemps, par contre, il faut tenir compte des apports d'eaux qui transitent plus rapidement et qui ont peu ou pas de contact avec le sol.

Roberge (1987) a quantifié la contribution du ruissellement hypodermique, de l'écoulement non saturé et l'écoulement saturé à la recharge du lac. Le ruissellement de surface n'a pas été considéré dans le bassin car la structure du sol organique permettait la présence d'écoulement en conduit plutôt que du ruisellement de surface.

L'écoulement hypodermique en conduit entre le sol minéral et la couche de matière organique n'était présent que lorsque les niveaux d'eau souterraine étaient élevés. En tout, l'écoulement hypodermique représentait moins de 22% des

apports saisonniers en eau. Néanmoins, sur des courtes périodes (échelle horaire) il pouvait devenir la principale source d'alimentation en eau du lac. Le nombre de jours avec de l'écoulement hypodermique en conduit était de 16, 20 et 21 en 1982, 1984 et 1985 respectivement. L'écoulement en conduit était maximum de 4 à 10 heures après les apports d'eau.

L'écoulement non saturé dans le sol, pour sa part, semblait limité à un écoulement vertical et avait une contribution négligeable dans le cheminement des eaux de fonte vers le bas du versant. Par exemple, au total 28 000 l et 23 000 l ont été mesurés pour cette composante en 1981 et 1982.

L'écoulement saturé dans le till demeurait donc au printemps, la principale voie de cheminement des apports en eau au lac (80% ou plus de l'écoulement printannier sur les versants). La capacité de décharge maximale pour les eaux souterraines a été estimée à 120 l/h/m ou des apports d'eau de 12 mm/j. Contrairement à l'hiver, les apports printanniers pouvaient atteindre 50 mm/j. La capacité de décharge de l'aquifère pouvait donc être dépassée quelques fois durant la fonte, d'où l'apport d'eau moins neutralisée au lac.

Le cheminement des eaux de fonte semblait donc réparti comme suit en 1984; du total de 560 mm de pluie et de fonte, 437 mm ont été attribués à l'écoulement souterrain en zone saturée et 123 mm à l'écoulement en conduit (tableau 11).

La chronologie de l'écoulement au printemps peut ressembler à ce qui suit. Au début de la fonte, la nappe est basse et presque au niveau du lac. Les apports d'eau (pluie, fonte) conduisent à une augmentation graduelle du niveau de

Tableau 11. Répartition de l'écoulement durant la fonte

Année	Total	Écoulement souterrain	Écoulement en conduit
1984	560mm	>437mm	<123mm
1985	551mm	>440mm	<111mm

la nappe en commençant au bas de la pente. Après une période continue d'apports, d'habitude entre 100 et 150 mm, le niveau de saturation est atteint plus haut sur le versant et des apports élevés augmentent fréquemment le niveau de la nappe jusqu'à la surface du sol sur toute la longueur du versant. Ces conditions seraient propices à l'écoulement hypodermique en conduit. Le niveau de la nappe diminue rapidement lorsque les apports diminuent.

Il y a des différences importantes entre l'eau de recharge provenant des eaux souterraines et de l'écoulement en conduit. Les apports d'eau de l'écoulement en conduit, en plus d'être distribués différemment dans le temps, ont de courts temps de résidence dans le sol, peu de contacts avec le sol minéral et plus de contacts avec la matière organique et une température près de zéro, donc une densité plus faible que celle de l'eau souterraine.

Au niveau du bassin lacustre, il y a peu d'effets sur la qualité de l'eau avant l'apport massif d'eau de la zone de recharge. Alors, le lac est couvert graduellement en partant des berges vers le centre par une couche d'eau plus acide d'une épaisseur de 0,5 à 1 m. Cette couche flotte sur le dessus du lac juste sous le couvert de glace, ne se mélange pas avec l'eau plus profonde et disparaît rapidement

à la fin de la fonte. La couche acide est alimentée par l'apport de l'écoulement de surface d'environ 50 à 100 mm tandis que le reste du lac est alimenté par l'écoulement souterrain. Au centre du lac, l'acidification maximale a lieu avec les débits de crue alors que le long des berges, l'acidification maximale est plus importante et a lieu durant le premier 30% de la fonte.

4.4 L'influence des sols

Au printemps, le contact avec le sol est un élément important pour la neutralisation de l'eau de fonte. Ce même rôle est joué par le sol durant toute l'année. Le sol est défini ici comme étant le premier mètre sous la surface. Les divers processus dans le sol (minéralisation, échange ionique, assimilation, dissolution, lessivage) se déroulent dans différents horizons et les processus dominants dépendent de l'horizon qui a le plus long temps de contact avec l'eau.

Les taux de mouvement de l'eau dans les compartiments du sol ont été calculés par un modèle (Bobba et al., 1986). La demi-vie du temps de résidence de l'eau dans le haut du sol (0,5m), le bas du sol (0,75m) et la zone de saturation (5,5m) était de 1,5 jours, 8,7 jours et 11,2 jours respectivement.

Un exemple de la composition chimique de l'eau du sol est donné au tableau 8. Cependant, la qualité de l'eau dans le sol est différente d'un horizon à l'autre et peut également varier selon la distance du lac. L'acidité de l'eau dans la couche de surface est souvent plus forte que celle des précipitations. Toutefois, le pH du sol augmente avec la profondeur ce qui indique que la neutralisation de l'ion hydrogène dans le sol est considérable.

La surface du sol contient un pourcentage plus grand de matière organique (23-29%) et une capacité de neutralisation plus grande que le sol minéral (Rutherford et al., 1985). Bien que la capacité d'exchange cationique (CEC) du sol minéral est faible, cette couche est beaucoup plus épaisse que la couche organique.

En plus d'être acide, l'eau de la couche organique est assez minéralisée. Le sol organique semble être le site d'immobilisation des nitrates par les microorganismes, de nitrification, de dénitrification, de déplacement d'ion ammonium de leurs sites d'échange, de minéralisation du soufre organique, de solubilisation de l'aluminium et de remplacement des cations majeurs, du fer et du manganèse des sites d'échange de l'horizon organique (Thomassin et Jones, 1987). C'est également dans les horizons L, F et H que la plupart des racines d'alimentation se retrouve à cause des concentrations élevées d'éléments nutritifs et l'effet protecteur de la chélation de l'aluminium par la matière organique soluble.

L'eau dans le sol minéral a un pH plus élevé, des concentrations plus élevées de cations de base et d'alcalinité mais moins de nitrates. Les concentrations des cations de base (Ca, Mg, Na, K) peuvent augmenter suite à l'apport par la minéralisation ou par échange ionique. Lorsque le pH est supérieur à 4,5, H^+ s'échange avec les cations de base si le pH est inférieur à 4,5, H^+ s'échange avec Al^{+3} (Harvey et al., 1981). La minéralisation produit des cations de base pour remplacer l'approvisionnement. Dans les travaux de Rutherford et al. (1985), les taux de lessivage du sol pour le bassin du lac Laflamme étaient estimés à 11 kg/ha Ca, 5 kg/ha Al, 4 kg/ha K et 3 kg/ha Mg.

Le sol minéral est également le site de précipitation ou d'adsorption de certains composants. Ainsi l'aluminium lessivé de la couche LHF, ne quitte pas nécessairement le sol car il peut être précipité dans l'horizon B. L'horizon B est aussi le site d'adsorption et de désorption des sulfates. La capacité de retenir les sulfates est reliée à l'adsorption par les sesquioxides du sol et à la rétention par la matière organique. La rétention semble être dépendente du pH.

Au bassin du lac Laflamme, Hern et al. (1985) ont trouvé que lorsque de l'eau déminéralisée était ajoutée au sol, les sulfates étaient mobilisés de la matière organique, retenus dans le sol minéral (horizon B) et le résultat était un faible taux de minéralisation net du soufre (4,2 mg/l SO_4 à 40cm). Cette concentration est semblable à celle retrouvée dans le lac et à l'exutoire. Lorsqu'une solution avec beaucoup de sulfates était ajoutée au sol (4,1 mg/l S), la rétention des sulfates augmentait mais la concentration des sulfates dans l'eau a tout de même atteint 6 mg/l SO_4. Les premiers 12 cm de matériel du sol étaient capables d'accepter 0,97 g S avant de ne plus être capable de retenir du soufre additionnel.

Une question importante dans le contexte de l'acidification de l'environnnement est de savoir si la capacité actuelle de neutralisation des sols et des dépôts meubles diminue. L'acidification expérimentale des parcelles de sol peut fournir des éléments de réponse. Une acidification expérimentale a été effectuée dans le bassin du lac Laflamme avec des solutions de pH de 3,5 et 2,0 (Rutherford et al., 1985; Hern et al., 1985). Très peu d'effets ont été notés au niveau de l'acidification de 3,5. A une acidifica-

tion de 2,0, plusieurs réactions ont eu lieu qui peuvent être indicatives des résultats attendus pour une acidification à long terme.

Il y avait peu d'effets sur le pH de l'eau des pores, donc le sol pouvait encore neutraliser l'eau acide. Il y avait peu d'effet sur le N total du sol et la nitrification était supprimée mais sans toutefois être une fonction simplement du pH de l'eau. Par contre, le contenu total de soufre avait augmenté surtout dans l'horizon B et les taux de lessivage de cations avaient augmenté à 17 kg/ha Al, 7 kg/ha Mg, 14 kg/ha Ca et 6 kg/ha K. Un taux de mobilisation encore plus important de l'aluminium avait été noté plus haut dans le profil mais la redéposition a diminué le taux net de lessivage. Il semble y avoir eu une réduction de la CEC (de 2 070 à 1 520 mole/kg) et de la saturation en bases (SB) (de 59% à 24%) dans la couche humique seulement (tableau 12). En dernier lieu, des diminutions significatives dans les oxydes de fer du sol ont été notées juste sous l'horizon Ae.

Boutin et Robitaille (1987) ont également procédé à l'acidification des colonnes de sol du bassin en laboratoire. Ils ont observé lors de l'acidification avec une solution de pH 2,6 de la couche organique qu'il y avait des pertes de calcium, magnésium et potassium et une diminution de la saturation en base, une diminution d'environ 0,5 unité dans le pH, une augmentation de l'aluminium et une suppression de la nitrification. Dans le sol minéral, à un même niveau d'acidification, il n'y avait pas de perte de bases échangeables mais il y avait une augmentation de l'ion hydrogène et de l'aluminium et une légère augmentation dans la CEC.

TABLEAU 12

Les effets de l'acidification expérimentale sur la capacité d'échange cationique (mole/kg x 100) et sur la saturation en base (%) sur des colonnes de sol en laboratoire (Rutherford et al., 1985).

Horizon ou Profondeur (cm)	pH 5,7		pH 3,5		pH 2,0	
	CEC	SB	CEC	SB	CEC	SB
LH	20,7	59	21,0	58	15,2	24
Ae	1,5	28	2,9	26	1,5	27
15-20	3,7	12	4,3	10	2,7	10
20-30	3,9	12	3,8	10	4,1	6
30-45	3,5	15	3,5	13	3,8	10
45	2,5	22	2,9	18	3,1	18

4.5 Les eaux souterraines

La qualité de l'eau souterraine varie beaucoup d'un point à l'autre du bassin (tableau 8). Par exemple, l'alcalinité varie de 0 à 600 µeq/l d'un site à l'autre (Bernier et al., 1983). Les augmentations d'alcalinité sont accompagnées d'augmentation du pH, du calcium, du magnésium et du sodium. La différence dans les eaux souterraines semble reliée aux propriétés du matériel où l'eau circule et au temps de résidence de l'eau dans les dépôts meubles.

Dans les piézomètres de surface (1m), l'eau est encore acide (pH=4,8) avec peu ou pas d'alcalinité et cette acidité favorise des concentrations élevées d'aluminium (0,36-0,89 mg/l). La composition de l'eau est dominée par le calcium et les sulfates. Les concentrations des ions majeurs sont semblables à celles dans les eaux du sol.

Dans la composante eau souterraine, c'est la qualité des eaux des piézomètres peu profonds qui est la plus variable et cette variabilité dépend du temps depuis la dernière infiltration et de son importance. Une acidification épisodique de l'eau souterraine a été enregistrée à l'automne 1982 dans les piézomètres peu profonds seulement.

A une profondeur de 4m, l'alcalinité, le calcium, le magnésium, le sodium, les silicates et le potassium ont des concentrations plus importantes qu'à 1 m tandis que l'ion hydrogène, les nitrates et l'aluminium et à un moindre degré les sulfates et le manganèse ont des concentrations moins élevées qu'à 1 m. La neutralisation de l'ion hydrogène qui a commencé dans les horizons du sol, continue probablement par l'action de la minéralisation des silicates comme les feldspaths potassiques et les plagioclases. La minéralisation

des silicates dans ce type de climat produit la kaolonite et libère des cations (Ca, Na, K, Mg, Fe) et il y a mise en solution des silices amorphes (Azzaria et al., 1982). Le magnésium et le manganèse peuvent également être trouvés dans les minéraux tels l'hypersthène et le magnétite.

Les mêmes tendances dans la qualité de l'eau observées à 4 m ont été retrouvées à l'exutoire dans les piézomètres profonds, bien que les silicates soient demeurés près de 16 mg/l. L'acidité de l'eau est faible (pH=6,6) et la capacité tampon est élevée. Les valeurs des sulfates sont de 60 µeq/l. La concentration des chlorures demeure la même dans tout le réseau souterrain. Bernier et al. (1983) ont trouvé que l'eau des zones de tourbières avait des caractéristiques plus semblables à l'eau profonde que l'eau des puits à des profondeurs équivalentes.

La qualité de l'eau varie beaucoup dans le bassin versant entre les eaux de précipitations diluées et acides et les eaux souterraines profondes beaucoup plus minéralisées ce qui indique l'importance des processus du milieu terrestre sur la qualité de l'eau. La chimie des eaux du lac dépendra donc de la répartition de l'eau à travers les différents chemins d'écoulement dans le système.

5. CHIMIE DU LAC ET DE L'EXUTOIRE

La chimie des eaux du lac en plus de dépendre des volumes et des types d'apport en eau, dépend des processus dans le lac et du stockage. Le régime hydrique et le régime thermique sont également des facteurs déterminants dans les variations de la qualité des eaux de surface.

5.1 Le régime thermique

Le régime thermique du lac est grandement influencé par les changements saisonniers de la température de l'air. Juste avant la prise des glaces au début novembre, il y a une période de quatre à cinq semaines où la température de l'eau est uniforme sur toute la colonne d'eau et elle diminue uniformément de 11 à 3°C. Durant cette période il y a également une homogénéité chimique.

Pendant les 26 semaines de couvert de glace, une statification inverse se développe avec les températures les plus basses à la surface et des températures plus élevées en profondeur (4,3°C). Le couvert de glace isole la surface du lac de l'atmosphère et les niveaux d'oxygène dissous diminuent au courant de l'hiver jusqu'à une saturation en oxygène aussi basse que 5% à 4 m à la fin avril.

La fonte massive précède le calage du lac qui a lieu généralement à la mi-mai. La stratification inverse dans le lac a pour effet de concentrer les apports d'eau de fonte acide dans la couche de surface du lac. La plupart des changements provoqués par les eaux de fonte disparaissent lors du brassage des eaux. Les températures les plus élevées dans l'eau à la surface du lac (22°C) sont mesurées en juillet et en août. La température à 4 m est d'environ 14°C

durant ces deux mois. La température maximale annuelle de la colonne d'eau est d'un peu plus de 17°C. Durant l'été, la saturation en oxygène est rarement inférieure à 50%.

5.2 La composition chimique annuelle du lac et de l'exutoire

Le pH moyen annuel du lac Laflamme a varié de 6,1 (1981) à 6,7 (1987) avec une moyenne de 6,4 (tableau 13). La conductivité annuelle, indicative d'une eau faiblement minéralisée, a varié de 20 µS/cm (1981) à 28 µS/cm (1982). Les années à fort débit, 1983 et 1986, sont celles où la couleur a été supérieure à 25 unités.

La composition ionique de l'eau du lac en terme d'équivalent est dominée par le calcium (121 µeq/l), les ions bicarbonates (108 µeq/l) et les sulfates (87 µeq/l). La somme des ions a varié entre 405 µeq/l (1988) et 459 µeq/l (1982).

Les concentrations des différents cations (Ca, Mg, Na, K, H) ont changé au fil des années mais leurs proportions relatives sont demeurées assez stables (figures 16 et 17) avec le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium représentant 57%, 21%, 19% et 3% de la somme des cations respectivement. L'importance relative de l'ion hydrogène est faible dans l'eau du lac (< 1%).

Dans le cas des anions, les variations interannuelles sont plus importantes que pour les cations. L'importance relative des sulfates et des bicarbonates varie d'une année à l'autre avec un pourcentage maximum de 57 % dans le cas des bicarbonates et de 43% dans le cas des sulfates. Bien que sur une base annuelle l'ion bicarbonate domine les sulfates pendant plusieurs semaines, l'été, les bicarbonates diminuent au point où les sulfates deviennent l'ion dominant.

TABLEAU 13

Moyennes annuelles des paramètres chimiques au centre du lac Laflamme

AN	pH	H	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO_4 mg/l	P mg/l	NO_3 mg/l	Alc mg/l	Cond µS/cm	Coul unité	Al mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l	Fe mg/l
81	6,12	1,79	2,39	0,50	0,92	0,16	0,36	3,62*	0,040	0,12	4,58	20	18	0,098	0,027	0,006	0,112
82	6,25	0,65	2,60	0,54	0,99	0,22	0,44	3,74	0,037	0,14	6,75	28	24	0,119	0,015	0,003	0,111
83	6,33	0,55	2,42	0,54	0,90	0,28	0,42	4,05	0,028	0,13	5,39	24	27	0,069	—	0,004	0,126
84	6,39	0,47	2,40	0,53	0,95	0,22	0,40	4,12	0,031	0,11	5,50	22	23	0,072	0,014	0,004	0,133
85	6,38	0,47	2,45	0,54	0,94	0,23	0,43	4,49	0,040	0,10	5,50	26	21	0,110	0,015	0,006	0,145
86	6,50	0,35	2,38	0,53	0,89	0,25	0,42	4,26	0,042	0,06	5,07	24	29	0,109	0,022	0,006	0,142
87	6,72	0,21	2,36	0,55	0,99	0,18	0,38	4,27	0,036	0,07	5,46	25	24	0,081	0,017	0,005	0,129
88	6,60	0,29	2,32	0,53	0,91	0,20	0,37	4,36	0,043#	0,07	5,05	23	28	0,091	0,016	0,005	0,129
STATISTIQUES																	
MOY	6,41	0,60	2,42	0,53	0,94	0,21	0,40	4,14	0,037	0,10	5,42	24	24	0,094	0,017	0,005	0,130
E.t	0,32	1,47	0,45	0,10	0,19	0,10	0,09	0,48	0,012	0,11	1,84	5	8	0,040	0,013	0,002	0,058
MIN	4,6	0,10	1,3	0,26	0,4	0,04	0,1	2,3	0,014	<0,01	1,08	14	6	0,028	0,002	<0,001	0,014
MAX	7,0	25,12	3,7	0,8	1,6	1,0	0,8	5,9	0,083	0,52	10,05	36	69	0,297	0,080	0,016	0,440
CV%	5	246	19	18	20	45	24	12	32	110	34	20	35	43	76	47	45

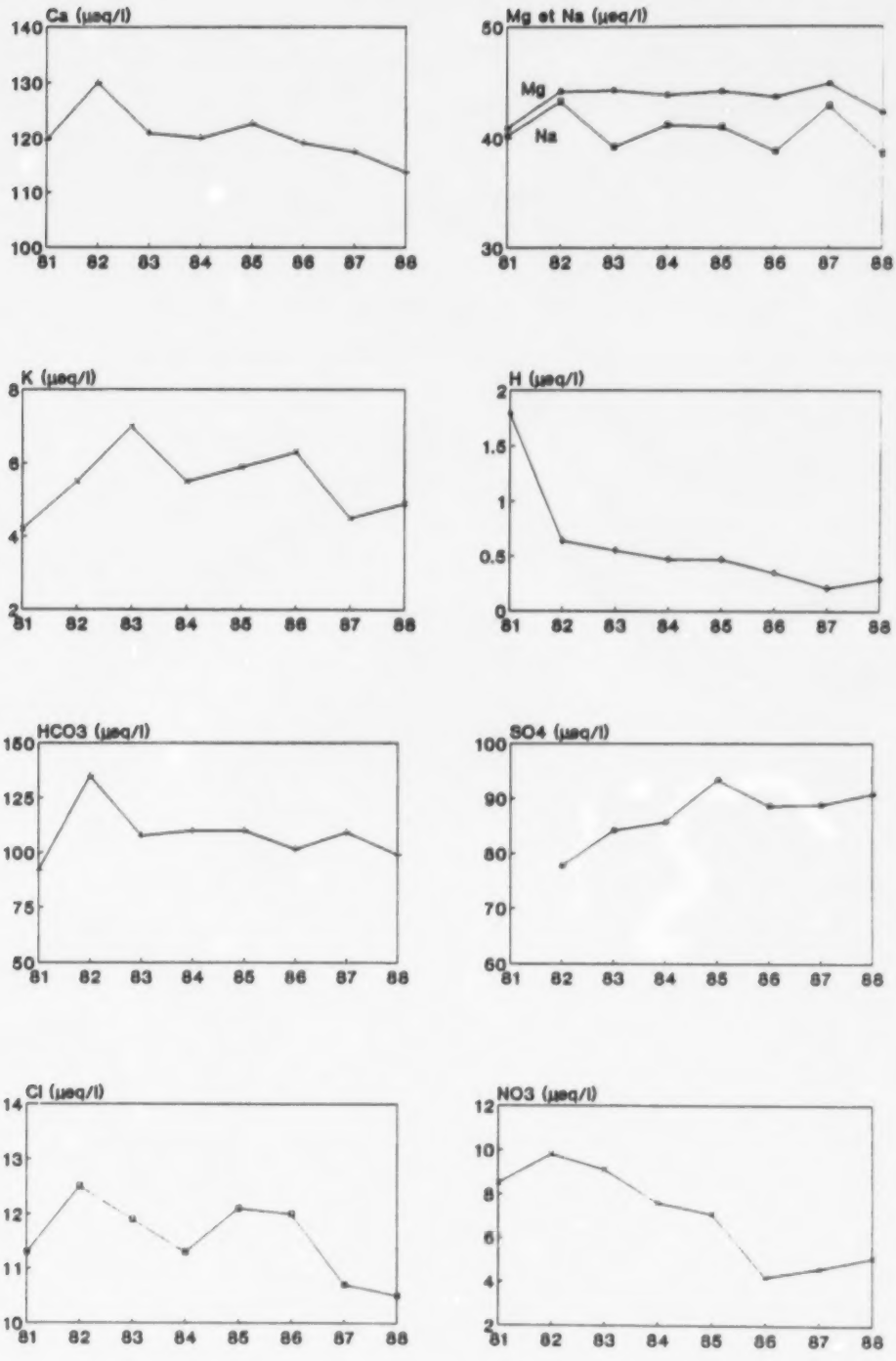
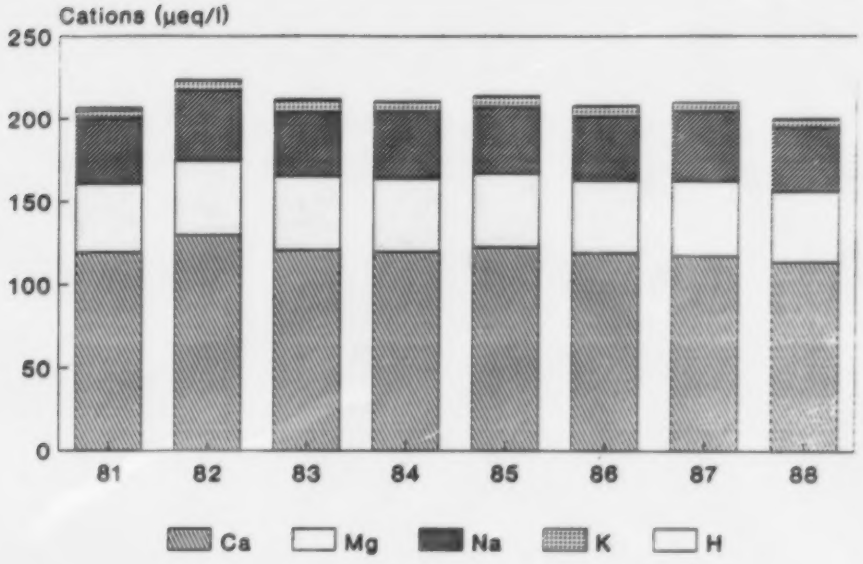
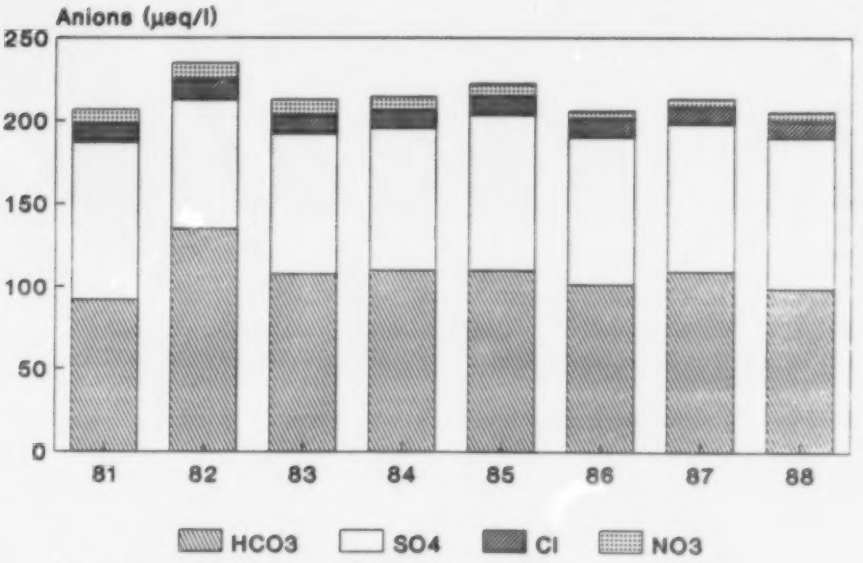


Figure 16: Moyennes annuelles des ions majeurs de l'eau du lac





La valeur de SO4 pour 1981 est estimée.

Figure 17: Composition de l'eau du lac Laflamme (1981-1988)

Les concentrations de sulfates sont toutefois supérieures à 60 µeq/l, seuil au-delà duquel les sulfates sont considérés comme étant d'origine anthropique plutôt que d'origine naturelle (Harvey et al., 1981).

Les ions chlorures (5%) et les nitrates (3%) complètent les anions. Les calculs d'équilibre des charges indiquent en général un excès d'anions (-2%).

Des huits métaux trace, quatre seulement sont régulièrement au-dessus de 0,001 mg/l (Al, Fe, Mn et Zn). L'aluminium varie de 0,028 à 0,297 mg/l, le fer de 0,014 à 0,44 mg/l et le manganèse de 0,002 à 0,08 mg/l. Le plomb, le cuivre et le nickel ont été détectés dans l'eau moins de 50 % du temps.

A l'exutoire, l'importance relative des cations est similaire à la distribution retrouvée dans le lac même si leurs concentrations sont plus basses que celles dans le lac (tableau 14, figure 18). Les concentrations de bicarbonates sont également plus basses dans l'eau de l'exutoire alors que l'inverse est vrai pour les sulfates et l'ion hydrogène. Bien que, depuis 1983, l'importance relative des bicarbonates et des sulfates sur une base annuelle soit, pour les deux, près de 45 %, en 1986 le pourcentage des sulfates (47 %) a dépassé celui des bicarbonates (44%).

L'eau de l'exutoire semble moins minéralisée et un peu plus acide que l'eau du lac avec des concentrations plus élevées d'aluminium et de manganèse. En effet, la chimie des eaux de l'exutoire tend à ressembler plus à celle des premiers deux mètres du lac qu'à celle du réservoir complet.

A cause de la petite taille du lac, la quantité de

TABLEAU 14

Moyennes annuelles des paramètres chimiques à l'exutoire du lac Laflamme

AN	pH	H	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO_4 mg/l	P mg/l	NO_3 mg/l	Alc mg/l	Cond µS/cm	Coul unité	Al mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l	Fe mg/l
81*	6,24	0,99	2,15	0,44	0,84	0,15	0,29	3,63	0,042	0,10	3,80	17	20	0,100	0,022	0,005	0,096
82	6,22	0,82	2,45	0,50	0,96	0,20	0,46	3,79	0,036	0,14	5,92	26	25	0,129	0,017	0,003	0,119
83	6,26	0,91	2,21	0,47	0,83	0,28	0,42	4,14	0,027	0,12	4,51	23	27	0,078	—	0,004	0,109
84	6,38	0,63	2,26	0,49	0,88	0,17	0,37	4,22	0,026	0,10	4,82	21	23	0,075	0,018	0,003	0,112
85	6,31	0,70	2,44	0,52	0,91	0,22	0,38	4,81	0,039	0,09	5,08	25	20	0,123	0,023	0,005	0,146
86	6,47	0,44	2,19	0,49	0,83	0,22	0,38	4,36	0,038	0,07	4,24	22	28	0,124	0,023	0,004	0,117
87	6,65	0,28	2,16	0,48	0,90	0,14	0,33	4,32	0,033	0,05	4,67	23	25	0,095	0,019	0,004	0,133
88	6,52	0,37	2,13	0,47	0,85	0,17	0,34	4,48	0,038#	0,07	4,01	22	28	0,096	0,019	0,004	0,121
STATISTIQUES																	
MOY	6,38	0,66	2,25	0,48	0,88	0,19	0,37	4,26	0,035	0,09	4,66	23	24	0,102	0,019	0,004	0,121
E.t.	0,34	1,20	0,48	0,10	0,20	0,10	0,09	0,60	0,012	0,11	2,05	5	8	0,046	0,016	0,002	0,061
MIN	5,0	0,10	0,8	0,1	0,1	<0,01	0,1	3,0	0,013	<0,01	0,21	12	7	0,039	0,003	<0,001	0,021
MAX	7,0	10,00	3,8	0,8	1,4	1,5	1,0	9,6	0,093	0,45	10,43	40	71	0,337	0,070	0,011	0,388
CV%	5	181	21	21	23	54	26	14	35	114	44	22	34	45	82	45	51

* mars à décembre sauf pour les sulfates de juillet à décembre # N=29

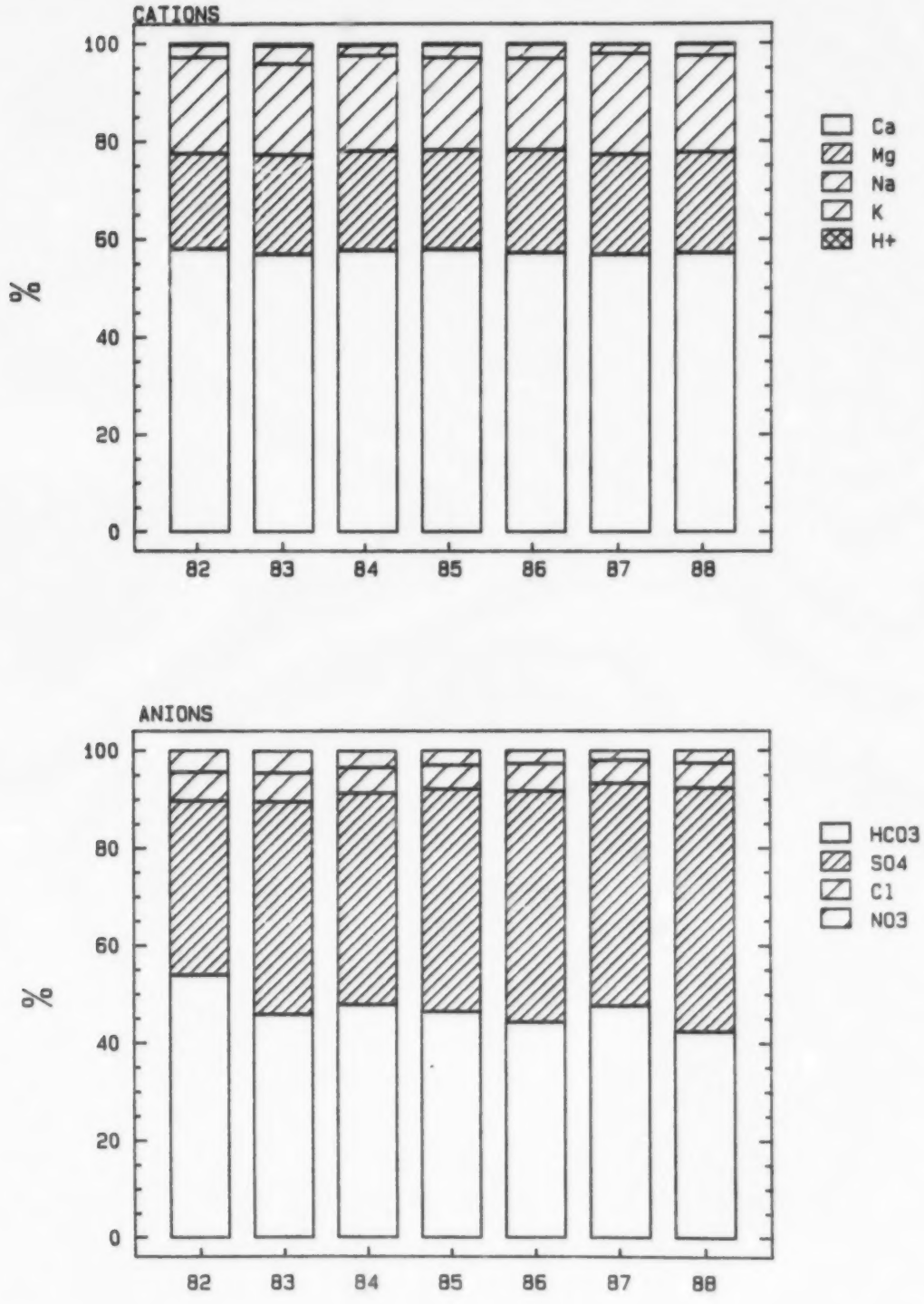


Figure 18: Composition relative de l'eau de l'exutoire (1981-1988)

matériel emmagasiné dans le lac lui-même représente seulement une fraction d'environ 25 % de la quantité de matériel qui est exportée du bassin chaque année. Par exemple, dans le cas du calcium, les quantités emmagasinées dans le lac sont de près de 300 kg tandis que l'exportation est de 1 200 kg. Les valeurs de sulfates sont plus élevées avec 500 kg dans le lac et une exportation annuelle de 2 400 kg. Les précipitations apportent environ 1 400 kg de sulfates au bassin.

5.3 Les lacs TADPA avoisinants le lac Laflamme

A proximité du lac Laflamme, plusieurs autres lacs sont étudiés dans le cadre des études sur les précipitations acides. Les lacs Macleod, Bonneville, Josselin, Veilleux et Lagou font partie du réseau de surveillance TADPA et sont situé à moins de 70 km de la Forêt Montmorency. Les lacs sont échantillonnés de deux à six fois par année, depuis 1983, avec des méthodes comparables à celles utilisées au lac Laflamme (Haemmerli, 1988).

Tout comme le lac Laflamme, les sols de ces bassins sont des podzols ferro-humiques et la végétation est composée de sapins baumiers, d'épinettes et de bouleaux blancs. La roche en place toutefois est de la mangérite (granite) plutôt que le gneiss retrouvé au lac Laflamme. Dupont (1989) a classé les groupes géologiques selon leur capacité de neutralisation de la charge acide comme suit: granite < quartzite < gneiss < gabbro-anorthosite.

Les surperficies de tous ces lacs sont supérieures à celle du lac Laflamme (annexe 3). Il y a également d'importantes différences dans la chimie des eaux de ces lacs (annexe 3, figure 19).

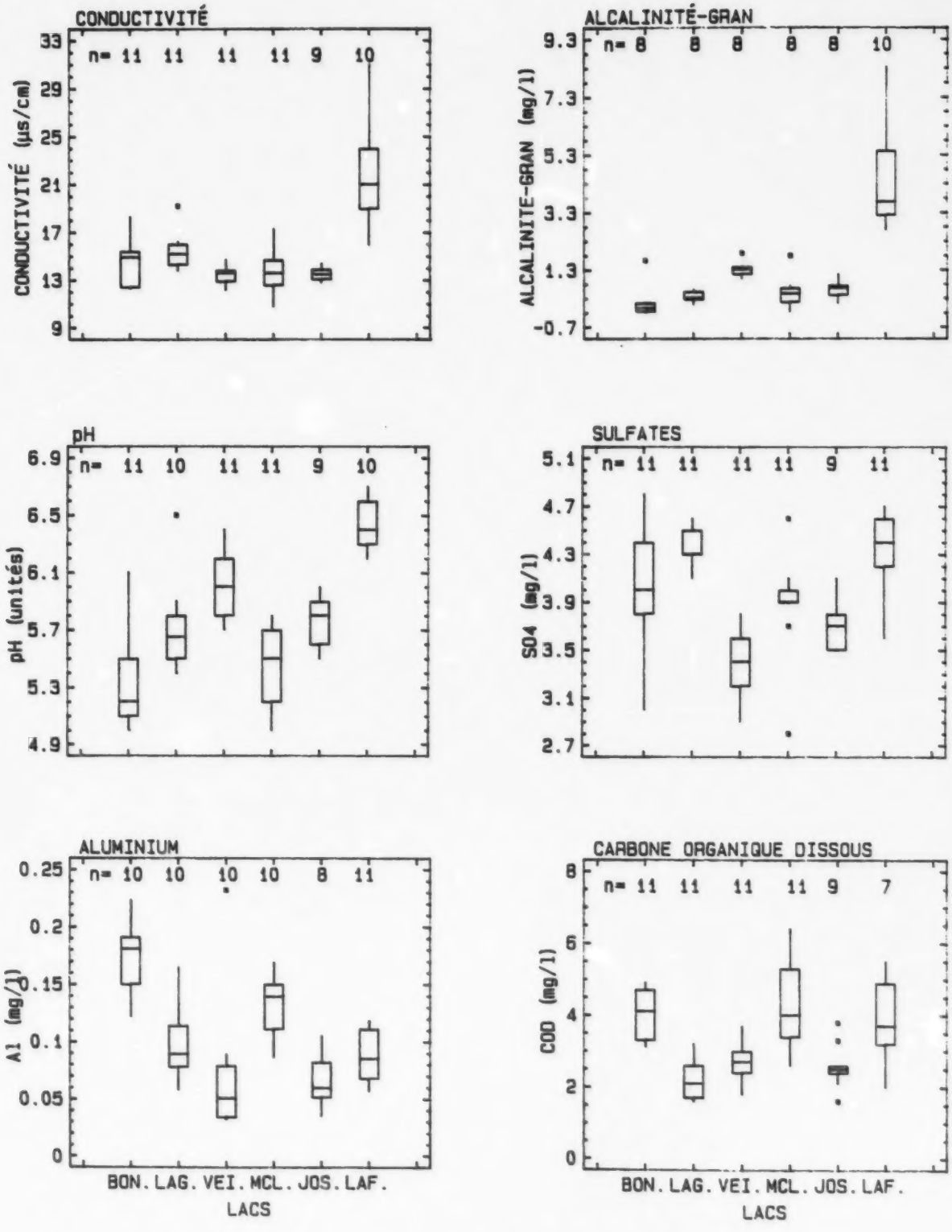


Figure 19: Caractéristiques chimiques de l'eau des lacs TADPA et du lac Laflamme (échantillonnage bi-annuel)

Dans ces cinq lacs, la minéralisation de l'eau (conductivité, Ca, Mg, Na) et l'alcalinité sont plus faibles qu'au lac Laflamme. Aux lacs Bonneville et McCleod, des alcalinités négatives ont même été enregistrées. Tous ces bassins sont donc plus vulnérables aux apports atmosphériques de composants acides.

Par contre, ces bassins sont affectés par les apports atmosphériques approximativement au même degré que le lac Laflamme. Les concentrations de sulfates dans l'eau (près de 4 mg/l) des lacs TADPA ressemblent plus aux valeurs mesurées au lac Laflamme que les indicateurs de sensibilité. Le lac Veilleux a des concentrations de sulfates plus basses que les autres lacs. Il est également entouré du plus petit bassin (0,36 km^2). Il semble y avoir eu un remplacement des bicarbonates dans l'eau des cinq lacs par les sulfates. Sur une base annuelle, les ions sulfates dominent les ions bicarbonates.

En 1983, le pH de l'eau plaçait les lacs TADPA dans la classe des lacs de transition soit un pH de 5,5 à Bonneville, un pH de 5,8 à Lagou et McCleod et un pH de 6,0 à Veilleux. Le lac Josselin n'a pas été échantillonné avant juin 1984 et son pH alors était de 5,8.

La contribution de l'acidité organique à l'acidité totale est probablement peu importante. La couleur médiane des lacs varie de 4 à 17 unité et la médiane de carbone organique dissous (COD) est près de 3,6 mg/l pour les lacs McCleod, Bonneville et Laflamme et près de 2,5 mg/l pour les lacs Josselin, Veilleux et Lagou. Les concentrations d'aluminium les plus élevées (>100 µg/l) ont été mesurées aux lacs Bonneville et McCleod.

Dans une même région, il y a donc des lacs de différentes sensibilités aux apports atmosphériques. Les réponses de la qualité de l'eau aux variations dans la qualité des précipitations notées au lac Laflamme risquent également d'être différentes dans ces six bassins versants.

5.4 Description statistique des séries temporelles du lac Laflamme.

Les séries d'observations de qualité de l'eau ont des caractéristiques distinctes. Les observations peuvent avoir une dépendance mutuelle, leur distribution peut être non normale et il peut y avoir des variations cycliques ou une dépendance liée au débit. Des valeurs manquantes, des valeurs sous une limite de détection ou des valeurs non validées sont également fréquentes dans les séries de qualité de l'eau.

Au lac Laflamme, plusieurs paramètres ont des cycles saisonniers (périodicité) prononcés ou des changements brusques (saut) qui peuvent être associés aux changements dans le régime hydrique, aux changements dans l'activité biologique et à l'augmentation de la charge acide au lac ou à l'exutoire. Les changements sont généralement plus prononcés à l'exutoire qu'au centre du lac bien que les variations soient semblables.

Les séries de qualité de l'eau du lac Laflamme seront décrites en terme de périodicité, de normalité, de persistance, de corrélation et de tendance temporelle (annexe 4). Un exemple est donné pour le calcium (tableau 15). Le choix de tests appropriés pour une série temporelle donnée a été étudié par Berryman et al. (1988) et un résumé des tests non paramétriques retenus est donné au tableau 16.

TABLEAU 15. Statistiques descriptives: calcium (mg/l)

CALCIUM (mg/l)

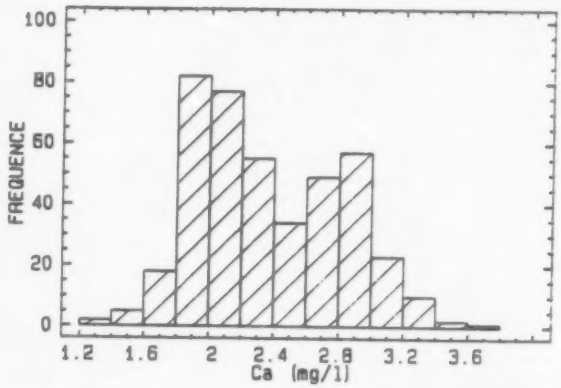
An	Moy	E.t	Min	Max
81	2.39	0.46	1.3	3.3
82	2.60	0.38	2.0	3.4
83	2.42	0.52	1.6	3.5
84	2.40	0.44	1.6	3.1
85	2.45	0.55	1.4	3.7
86	2.38	0.45	1.8	3.2
87	2.36	0.34	1.9	3.0
88	2.33	0.39	1.7	3.0
8ans	2.42	0.45	1.3	3.7

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 8 SEMAINES
TYPE : NON MARK (2)

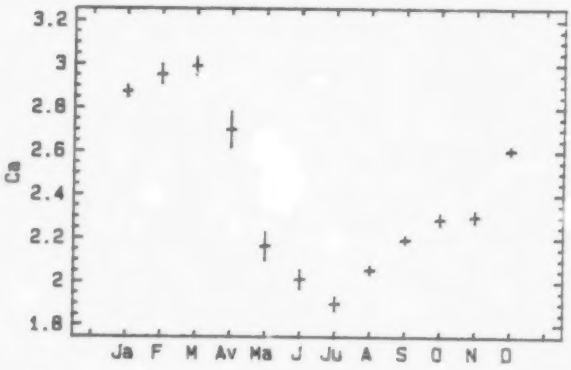
NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) Alc Mg Na
Cond NO3 P Fe

TENDANCE
REGRESSION : DIMINUTION
HIRSCH&SLACK: DIMINUTION
KENDALL SAI : DIMINUTION

HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988

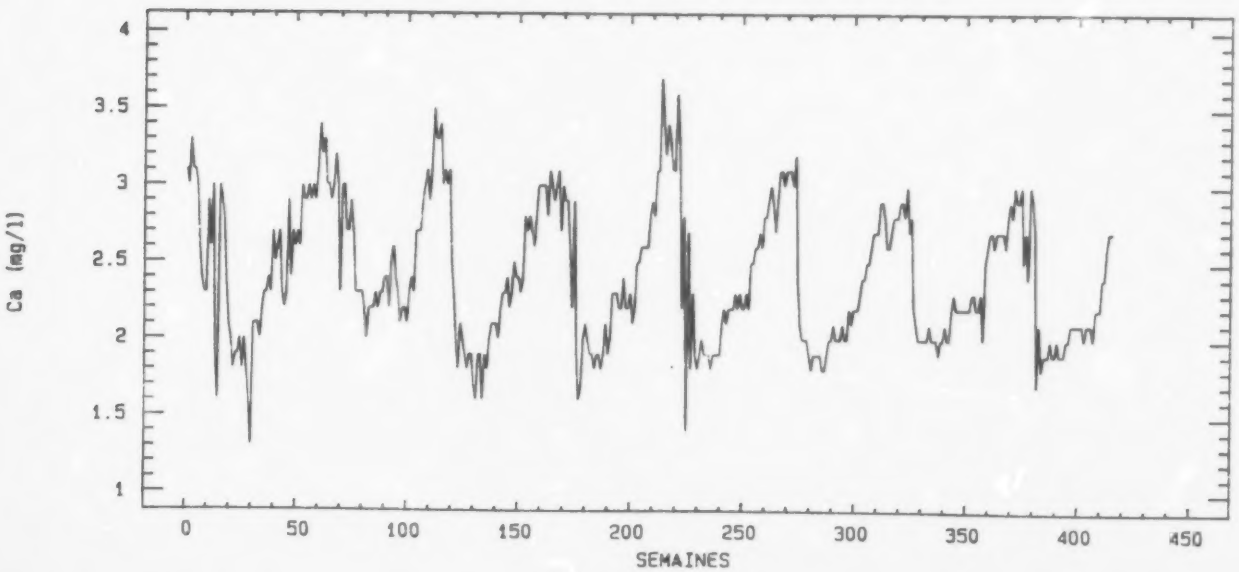


TABLEAU 16

Tests non paramétriques utilisés sur les séries temporelles des paramètres de qualité de l'eau au lac Laflamme

Test	Caractéristiques	Paramètres
Kendall	Persistance: non Périodicité: non	SO_4, pH, Al, Cl
Kendall Saisonnier	Persistance: non Périodicité: oui	Ca, Na, Mg, K, Cl, Cond, NO_3, coul., P, Alc., Fe, Mn, Zn
Spearman-Lettenmaier	Persistance: oui (Mark) Périodicité: non	SO_4, pH, Al, Cl
Hirsch & Slack	Persistance: oui Périodicité: oui	Ca, Na, Mg, K, Cl, Cond, NO_3, coul., P, Alc., Fe, Mn, Zn

La persistance dépend de l'intervalle de temps choisie pour le test. Par exemple un paramètre ayant une persistance de 6 semaines sera classé comme persistant au niveau mensuel mais non persistant au niveau saisonnier.

5.4.1 Alcalinité, calcium, magnésium, sodium, conductivité et phosphore

Les paramètres associés à la minéralisation tels le calcium, le magnésium, le sodium, la silice, la conductivité et l'alcalinité et l'élément nutritif phosphore possèdent des périodicités semblables. Les concentrations sont élevées en hiver à cause de la recharge du lac par un écoulement souterrain lent et diminuent rapidement avec la dilution de la fonte printannière (tableau 17). Les concentrations demeurent sous la moyenne annuelle durant l'été et augmentent progressivement durant l'automne lorsque l'écoulement et l'activité biologique diminuent. D'importants apports d'eau à l'automne ou des fontes hivernales provoquent une diminution des concentrations des paramètres de minéralisation.

L'amplitude des diminutions d'alcalinité, provoquées par le régime hydrique, est augmentée par la consommation de l'alcalinité employée pour neutraliser les apports d'eau acide. A l'exutoire, des valeurs d'alcalinité aussi basses que 0,3 mg/l $CaCO_3$ ou 6 µeq/l ont été mesurées durant la fonte alors que les valeurs d'hiver sont de 150 µeq/l. Comparativement, durant les pluies importantes de l'automne 1982, l'alcalinité n'est descendu qu'à 46 µeq/l.

Les gammes de variation de ces paramètres durant les huit ans de l'étude et les histogrammes associés sont donnés à l'annexe 4. Les distributions ne suivent pas une loi normale. La persistance des séries varie de sept à neuf semaines pour les paramètres de minéralisation et est de 11 semaines pour le phosphore.

Les corrélations sont fortes entre les paramètres de minéralisation (Ca, Mg, Na, alcalinité) avec des coeffi-

TABLEAU 17

Moyennes saisonnières des paramètres dans l'eau du lac Laflamme 1981-1988

	Hiver	Printemps	Été	Automne
Maximum l'hiver				
Ca (mg/l)	2,9	2,4	2,0	2,4
Mg (mg/l)	0,63	0,52	0,46	0,51
Na (mg/l)	1,1	0,9	0,8	0,9
Cond. (µS/cm)	28	25	21	23
Alc. (mg/l)	7,18	5,48	3,71	5,38
P (µg/l)	45	41	31	35
Cl (mg/l)	0,4	0,4	0,4	0,4
Zn (µg/l)	6	6	4	4
Maximum au printemps				
NO_3 (mgN/l)	0,20	0,20	0,02	0,04
H (µg/l)	0,83	1,05	0,34	0,40
Fe (µg/l)	0,154	0,178	0,081	0,125
K (mg/l)	0,23	0,29	0,21	0,17
Mn (µg/l)	0,024	0,033	0,012	0,009
Autres périodes				
pH	6,3	6,2	6,5	6,5
SO_4 (mg/l)	4,3	4,2	4,3	4,3
couleur	20	25	28	28
Al (µg/l)	81	97	111	106

Hiver : janvier à mars
Printemps: avril et mai
Été : juin à août
Automne : septembre à décembre

cients de corrélation (r) de plus de 0,8. Les coefficients de ce groupe avec la conductivité varient entre 0,64 et 0,72. Les coefficients de corrélation avec le phosphore sont encore moins élevés (0,46 à 0,56). Il existe également des corrélations significatives entre les paramètres de minéralisation et les nitrates et le fer. Les coefficients de corrélation avec le potassium sont faibles.

Matrice de corrélation

	Alc.	Ca	Mg	Na	Cond.	P
Alc.	---					
Ca	0,85	---				
Mg	0,83	0,83	---			
Na	0,83	0,82	0,83	---		
Cond.	0,72	0,71	0,65	0,64	---	
P	0,50	0,56	0,46	0,49	0,42	---
NO3	0,49	0,65	0,51	0,45	0,53	0,36

Les trois types de tests employés détectent les mêmes tendances temporelles pour les séries de huit ans des paramètres de minéralisation et du phosphore. La seule tendance significative est une diminution des concentrations de calcium d'un niveau initial de 2,54 mg/l à un niveau final de 2,3 mg/l. Ceci correspond à un changement inférieur à l'erreur quadratique moyenne résiduelle (RMSE) de 0,34 mg/l. Le RMSE est l'écart type de la série sans la tendance.

Pour la période de 1982 à 1985 lorsque les concentrations de paramètres acidifiants dans les précipitations étaient élevées, une diminution de l'alcalinité (Kendall Saisonnier, régression) (figure 16) et des diminutions du calcium, du sodium et de la conductivité (régression) ont été détectées.

Tendances temporelles de 1981 à 1988

Paramètres	Régression	Kendall Saisonnier	Hirsch et Slack
Ca	Diminution	Diminution	Diminution
Mg, alcalinité Na, conductivité	Non	Non	Non
Phosphore (81-87)	Non	---	Non

5.4.2 Nitrates, ion hydrogène, potassium, fer, manganèse, et zinc.

Ces six paramètres démontrent également de la saisonnalité avec des maximums à la fin de l'hiver ou au début du printemps et des concentrations qui demeurent généralement élevées durant la fonte.

Le cycle des nitrates réflète l'importance de l'assimilation biologique sur ce paramètre durant l'été. Au printemps, les changements de concentrations ne sont pas dictés par une simple dilution comme dans le cas du calcium. En effet, durant plusieurs années, lorsque les paramètres de minéralisation étaient à des niveaux minimums durant la fonte, les concentrations de nitrates étaient élevées. Ceci était causé par la combinaison d'une faible activité biologique et de l'apport au lac des eaux de fonte très concentrées en nitrates.

La fonte printannière est aussi responsable des augmentations de l'ion hydrogène dans le système en avril et mai. Ces augmentations sont plus prononcées à l'exutoire que dans le lac. Les diminutions du pH dans la couche de surface

du lac peuvent tout de même être importantes. Le pH de l'exutoire descend habituellement à des valeurs entre 5,0 et 5,4 alors que, dans la colonne d'eau au centre du lac, le pH est plus près de 5,8 sauf en 1981 quand l'acidification a été très prononcée.

Le potassium, le manganèse et le zinc ont également un maximum au printemps mais leurs minimums sont atteints plus tard que les nitrates soit à l'automne. Le potassium et le manganèse, bien que présents dans les sols comme les éléments de minéralisation, sont également présents de façon importante dans la végétation (mousses, écorces). Ils sont souvent associés au ruissellement printannier dans un bassin.

Le cycle du fer est différent des paramètres précédents car son minimum est atteint en été et les concentrations augmentent au début de l'automne pour diminuer légèrement par la suite.

Les histrogrammes des six paramètres sont données à l'annexe 4. Leurs distributions ne suivent pas une loi normale et la distribution des nitrates est particulièrement assymétrique à cause des valeurs très faibles mesurées durant l'été. La persistance des séries est de 8 à 11 semaines pour tous les paramètres sauf le fer où elle est de six semaines.

Les corrélations entre ces paramètres sont moins fortes qu'entre les paramètres de minéralisation. Les coefficients de corrélation les plus élevés pour le pH sont avec les nitrates ($r=-0,5$) et le manganèse ($r=-0,4$). Dans le cas des nitrates, les corrélations les plus fortes sont avec le calcium ($r=0,65$), le manganèse, le pH et la conductivité ($r=0,53$). Le fer est corrélé aux nitrates, au manganèse et aux paramètres de minéralisation. Le potassium et le zinc ne

Matrice de corrélation

	NO_3	pH	Fe	K	Mn
NO_3	---				
pH	-0,50	---			
Fe	0,43	-0,14	---		
K	0,29	-0,15	0,14	---	
Mn	0,60	-0,39	0,55	0,33	---
Zn	0,24	non sig.	0,20	0,18	0,36

sont pas fortement corrélés aux paramètres autre que le manganèse.

Il y a eu des tendances temporelles importantes dans les séries de ces paramètres. Une augmentation du pH (de 6,1 à 6,7) et une diminution des nitrates (de 0,15 à 0,04 mgN/l) ont été détectées. Le RMSE (Kendall) est de 0,18 unité pour la série du pH et de 0,08 mg/l pour la série des nitrates. Les tendances ne peuvent pas être associées à une saison particulière. Les diminutions les plus marquées ont eu lieu au printemps 1986 (nitrates) et en septembre 1986 (H^+). Ainsi, les changements importants de ces deux paramètres correspondent à la période de réduction des apports atmosphériques notée en 1986 et 1987.

Curieusement toutefois, entre 1982 et 1985, alors que les concentrations atmosphériques des nitrates et de l'ion hydrogene étaient à la hausse, des baisses de nitrates et de l'ion hydrogène dans l'eau du lac et de l'exutoire semblaient déjà amorcées. Les diminutions étaient toutefois moins prononcées qu'après 1985 et la seule tendance assez forte pour être détectée par les tests non paramétriques entre 1982 et 1985 est la diminution des nitrates à l'exutoire (0,15 à 0,07 mgN/l). Durant cette période, il pourrait y avoir eu une diminution des apports au lac par le

bassin terrestre (meilleure rétention) ou une consommation accrue de ces ions dans la cuvette lacustre elle-même.

De 1982 à 1985, il y a également eu une augmentation du fer (0,111 à 0,148 mg/l) dans les eaux du lac. Sur la période complète de huit ans, les tests non paramétriques n'ont pas détecté de tendances temporelles pour le fer, le manganèse, le zinc et le potassium.

Tendances temporelles de 1981 à 1988

Paramètres	Régression	Spearman/Lett.	Kendall
pH	Augmentation	Augmentation	Augmentation
	Régression	Hirsch & Slack	Kendall Sais.
NO_3	Diminution	Diminution	Diminution
Mn	Diminution	Non	Non
K, Zn, Fe	Non	Non	Non

5.4.3 Couleur, sulfates, chlorures et aluminium.

De ces quatre paramètres, seulement la couleur est vraiment saisonnière. Les chlorures démontrent une périodicité au lac mais pas à l'exutoire. L'aluminium et les sulfates n'ont pas de saisonnalité. Les trois derniers paramètres n'ont pas de relations significatives avec les autres paramètres.

La couleur est généralement élevée de mai à juillet et diminue par la suite pour atteindre un minimum au mois de janvier. Ce schéma ressemble à celui du débit (figure 5). La couleur d'une eau est attribuable à la présence de minéraux naturels tels que le fer et le manganèse et à des

sources organiques tels les substances humiques, les tannins et les lignines, des produits de la décomposition végétale. On associe généralement une couleur élevée à des périodes de fort ruissellement.

La distribution des valeurs de couleur ne suit pas une loi normale et la persistance de la série est de sept semaines. Les corrélations les plus importantes pour la couleur sont des relations inverses faibles avec les paramètres de minéralisation: alcalinité (r=-0,40), calcium (r=-0,41), magnésium (r=-0,39) et sodium (r=-0,41).

Les ions chlorures sont généralement considérés comme un élément conservatif dans un écosystème c'est à dire qu'iis ne participent presque pas aux réactions biologiques et chimiques du sol sauf pour une assimilation mineure par les plantes. Les concentrations semblent être influencées durant l'hiver par l'écoulement plus lent ou un apport de sel de déglaçage et durant l'été par des apports atmosphériques tout comme les sulfates.

La persistance de la série d'aluminium est élevée soit de 11 à 15 semaines et la distribution ne suit pas une loi normale. L'aluminium, bien que n'ayant pas de saisonnalité, a des concentrations plus élevées l'été que l'hiver.

Schofield et al. (1985) ont trouvé que les concentrations d'aluminium total étaient les plus élevées durant les périodes d'augmentation du débit et que durant les périodes de débit de base l'aluminium total diminuait. Des augmentations d'aluminium ont aussi été associées au printemps à l'augmentation de la température du sol et à des processus de dégradation (Hendershot et al., 1986). La source d'aluminium dans les eaux de surface est généralement les alumino silica-

tes du sol et divers types d'hydroxides d'aluminium. Sa solubilisation et son transport dépendent de la présence d'autres composantes (H, NO_3, SO_4, matière organique). Au Québec, les fortes concentrations en aluminium ne sont pas exclusivement associées aux lacs acides (Dupont, 1989).

L'aluminium est particulièrement important dans le contexte de l'acidification car certaines formes chimiques d'aluminium dissous exercent des effets toxiques sur les poissons d'eau douce. Au lac Laflamme, à des concentrations de 0,083 mg/l d'aluminium total, il y a environ 0,1 à 8 µeq/l d'aluminium dissous, Al^{3+} (Jones et al., 1984).

Les sulfates présentent très peu de saisonnalité mais démontrent des nettes tendances dans le temps. La série des données du lac a une persistance de 11 semaines et une distribution normale.

De 1981 à 1988, il y a eu des augmentations et des diminutions dans les séries de couleur et des sulfates. Les tendances pour la couleur peuvent être divisées en deux périodes. De décembre 1981 à décembre 1985, une tendance décroissante (27,8 à 25,2 unité) a été détectée par le test Kendall Saisonnier. Par après, les valeurs ont augmenté et la tendance pour la période complète est une augmentation. Donc, bien que la tendance globale des séries de couleur et de sulfates soit la même, les séries n'ont pas évolué de la même façon.

Les concentrations de sulfates dans l'eau reflètent les changements de concentrations dans les précipitations. Ainsi de juillet 1981 à décembre 1985, la série est passée d'un niveau initial de 3,6 mg/l à un niveau final de 4,5 mg/l.

Tendances temporelles de 1981 à 1988

Paramètres	Régression	Hirsch & Slack	Kendall Sais.
Couleur	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Cl	Non	Non	Non

	Régression	Spearman-Lett.	Kendall
SO_4	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Al	Non	Non	Non

Par après, en 1986 et 1987, il y a eu une diminution des sulfates dans les eaux du lac et de l'exutoire sans toutefois revenir au niveau de 1981. La tendance temporelle de la série demeure donc une augmentation des sulfates. Le RMSE (Kendall) de la série complète est de 0,23 mg/l.

Les valeurs de sulfates de la première moitié de 1981 n'ont pas été utilisées dans l'étude de tendance car elles sont considérées comme trop élevées. La combinaison du peu de valeurs historiques et de la nature très particulière des fontes hivernales et printannières de 1981 fait qu'il est difficile d'estimer un niveau raisonnable de sulfates pour cette période. Dans une étude de Jones et Bisson (1980), des niveaux de 4,7 mg/l ont été mesurés durant l'hiver de 1980 et les valeurs ont chuté à 3,2 mg/l après la première fonte.

Des études isotopiques des sulfates suggèrent que les précipitations sont bien la source principale de sulfates pour le lac Laflamme et qu'ils subissent des modifications chimiques probablement au niveau du sol forestier (Caron et al., 1986).

Sur une période de huit ans, les séries d'aluminium et des chlorures ne démontrent pas de tendance temporelle. Dans la série d'aluminium, les valeurs semblent varier par sauts avec des changements prononcés en mai 1982, avril 1983, avril 1984 et mai 1985. A l'exutoire, les concentrations de chlorures ont augmenté à partir de 1981 jusqu'en juillet 1982 (1,0 mg/l) pour ensuite diminuer. Les valeurs élevées en 1982 ne correspondent cependant pas à une période de charges atmosphériques importantes de cet ion.

En résumé, les variations dans la qualité des eaux de surface de 1981 à 1988 sont les suivantes. Pour plusieurs séries, aucune tendance temporelle n'a été détectée par les tests non paramétriques et ce sont: la conductivité, le sodium, le magnésium, le potassium, l'aluminium, le manganèse, le phosphore et le zinc. Des tendances pour le fer (augmentation), les chlorures (diminution) et l'alcalinité (augmentation) ont été détectées pour la première partie de la série seulement soit au lac ou à l'exutoire. Durant cette période, une augmentation des sulfates et une diminution de la couleur et des nitrates (exutoire) ont également été notées.

Après 1985, des diminutions de l'ion hydrogène, des nitrates et du calcium et une augmentation de la couleur ont été détectées sur les séries complètes (1981-1988). La diminution des sulfates semble être tamponnée dans le bassin et les concentrations n'ont pas diminué au point de renverser la tendance croissante des sulfates. La prochaine étape est de faire un rapprochement entre la qualité des précipitations et les tendances mentionnées ci-haut dans un contexte d'acidification des écosystèmes.

5.5 Relation entre les tendances temporelles des précipitations et des eaux de surface

La relation entre les sources de substances acidifiantes, les niveaux d'émission, les charges atmosphériques dans les régions cibles et la qualité des eaux de surface à ces sites est une question importante et complexe.

Bien qu'il y ait peu de données historiques sur la qualité des précipitations au Québec, il y a toutefois des estimations pour les trente dernières années des émissions canadiennes de SO_2 et NO_x (CFPCRS, 1986).

Au Canada, les émissions sont passées de 4,6 millions de tonnes en 1955 à 6,7 millions de tonnes en 1970 avant de tomber à 4,6 millions de tonnes en 1980. De 1979 à 1982, la baisse des émissions de SO_2 s'est accélérée. Ce phénomène a coïncidé avec la récession économique. D'après certains indices, les émissions se sont de nouveau accrues de 1983 à 1985. Au Québec, les émissions de SO_2 ont diminué de 19% entre 1972 et 1980 (figure 20) et par la suite ont passé de 1,09 à 0,74 millions de tonnes entre 1980 et 1984.

Les émissions canadiennes de NO_x ont largement doublé depuis le début des années 1950, en passant de 0,6 millions de tonnes en 1955 à 1,7 millions de tonnes en 1980. Au Québec, les émissions de NO_x ont également augmenté de 1970 à 1980 (Environment Canada, 1986).

La surveillance de la qualité des précipitations proprement dite sur le territoire québécois par le REPQ a débuté en 1982. De 1982 à 1986, il n'y a pas eu de changements significatifs dans la qualité des précipitations du sud du Québec alors qu'au nord du 48 parallèle, il y a eu

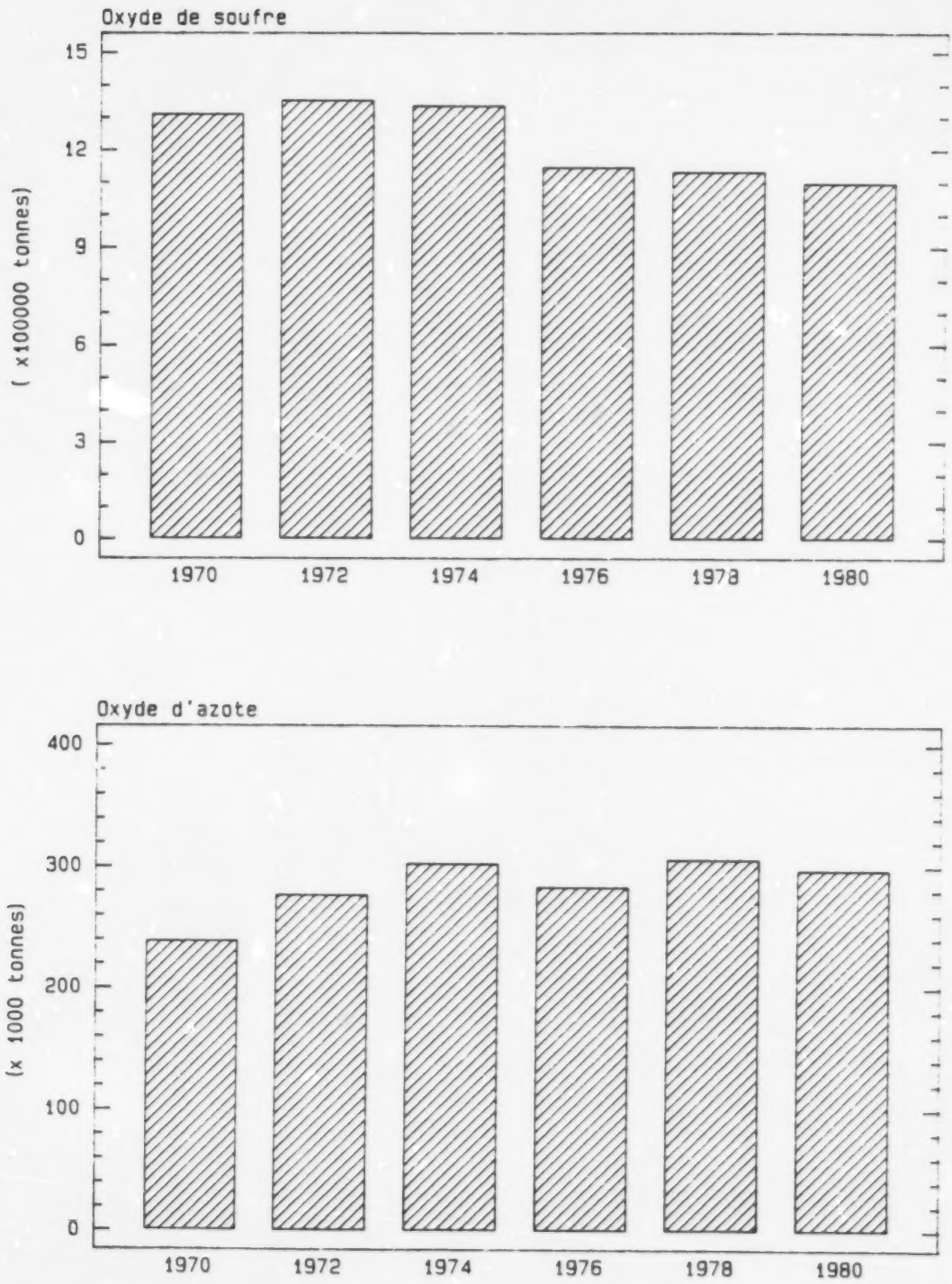


Figure 20: Émissions des oxydes de soufre et d'azote au Québec (Environnement Canada, 1986)

une baisse significative des sulfates en 1986. Cette baisse pourrait être reliée soit à un changement de trajectoire, soit à la diminution temporaire des émissions de Rouyn Noranda qui contribue à environ 80 % des dépôts dans cette région. La station provinciale de la forêt Montmorency semble être dans la partie du territoire qui a connu des baisses de charges atmosphériques en 1986. Il demeure difficile de savoir comment la qualité des précipitations des années 1980 se compare à celle des années 1970. Ainsi, la qualité des eaux de surface pourrait être encore en train de s'équilibrer avec des changements importants de la dernière décennie et reflèterait plus ces changements que les changements moins prononcés des dernières années.

Selon les théories d'acidification, dans un milieu aquatique soumis à des apports atmosphériques acidifiants, il y aura une diminution de l'alcalinité et une augmentation des sulfates suivis de diminutions dans le pH et une augmentation des paramètres de minéralisation (échange ionique avec H^+) et de métaux trace (apports directs, solubilisation ou échange ionique avec H^+). Il pourait aussi avoir des augmentations des nitrates (Wright et al.,1986).

Les effets d'une diminution des apports atmosphériques sont moins bien connus. A Sudbury, des augmentations du pH et des diminutions de sulfates, de métaux trace (Al, Cu, Ni, Zn) et des cations majeurs ont été notées après une diminution des apports atmosphériques (Dillon et al., 1986). En Norvège, lorsque les précipitations acides étaient remplacées par des précipitations propres, Wright et al. (1986) ont noté une diminution rapide des nitrates suivie de diminutions plus lentes des sulfates, de l'acidité et de l'aluminium.

De 1982 à 1985, le bassin du lac Laflamme a été

soumis à des précipitations apportant plus de 20 kg/ha/an de sulfates humides. Une acidification possible du milieu et des lacs avoisinants pouvait donc être attendue.

Au lac Laflamme, les tendances détectées dans les eaux de surface étaient des augmentations des sulfates, du fer et du zinc et des baisses d'alcalinité et de couleur (figure 21). Toutefois, le pH et les nitrates n'ont pas varié selon les théories d'acidification. L'acidité et les concentrations de nitrates ont diminué. Le bassin ou le lac semble donc avoir mieux neutralisé les charges atmosphériques d'acide ou avoir diminué sa production interne de ces ions.

Les études paléolimnologiques démontrent que les taux de certains métaux (Pb, Ni, Cd, SO_4) ont augmenté dans les sédiments récents, indiquant les effets des apports atmosphériques, sans qu'il y ait d'indication d'acidification récente du lac Laflamme (Dixit et al. 1987; Ouellet, 1980).

Dans les lacs avoisinants qui sont plus sensibles à l'acidification, la réponse du milieu aquatique à des charges de plus de 20 kg/ha/an est plus frappante. Les séries de 1983 à 1985 sont toutefois trop courtes pour vérifier statistiquement ces réponses. Dans tous les lacs sauf Josselin, les concentrations de sulfates ont augmenté durant la première moitié du réseau (1983 à 1985) d'entre 0,6 à 2,5 mg/l (figures 22 et 23). Il y a également eu acidification des cinq lacs. Le degré d'acidification dépendait du niveau initial d'alcalinité du lac et de la masse des bicarbonates dans l'ensemble de la cuvette (tableau 18). Ainsi les pH des lacs Bonneville, McCleod, Lagou, Josselin et Veilleux sont descendus respectivement à 4,9 5,0 5,4 5,5 et 5,7.

Dupont (1989) à l'aide du logiciel SIGMA/SLAM a

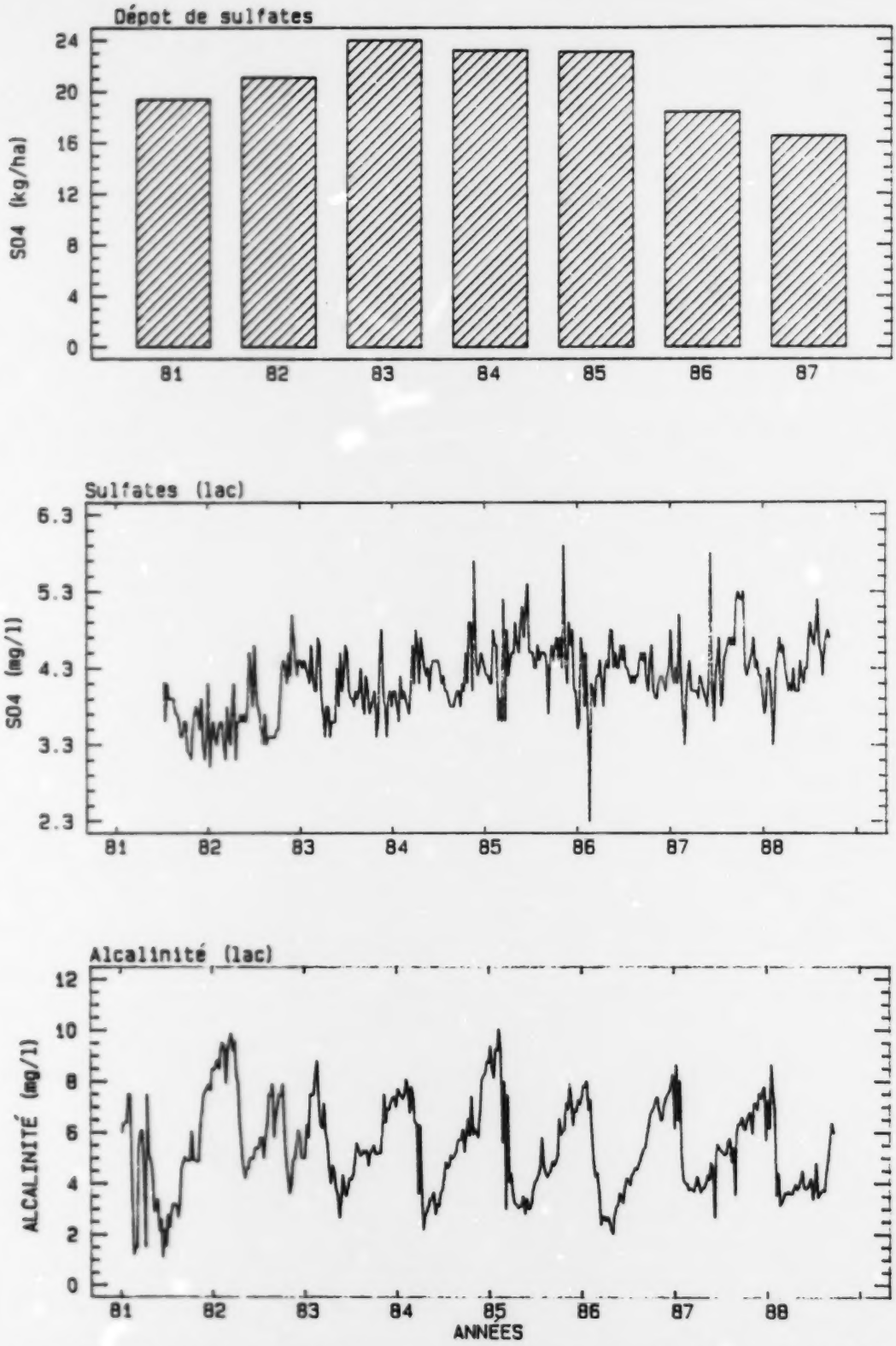


Figure 21: Dépôts atmosphériques de sulfates et concentration de sulfates et alcalinité dans l'eau de surface au lac Laflamme

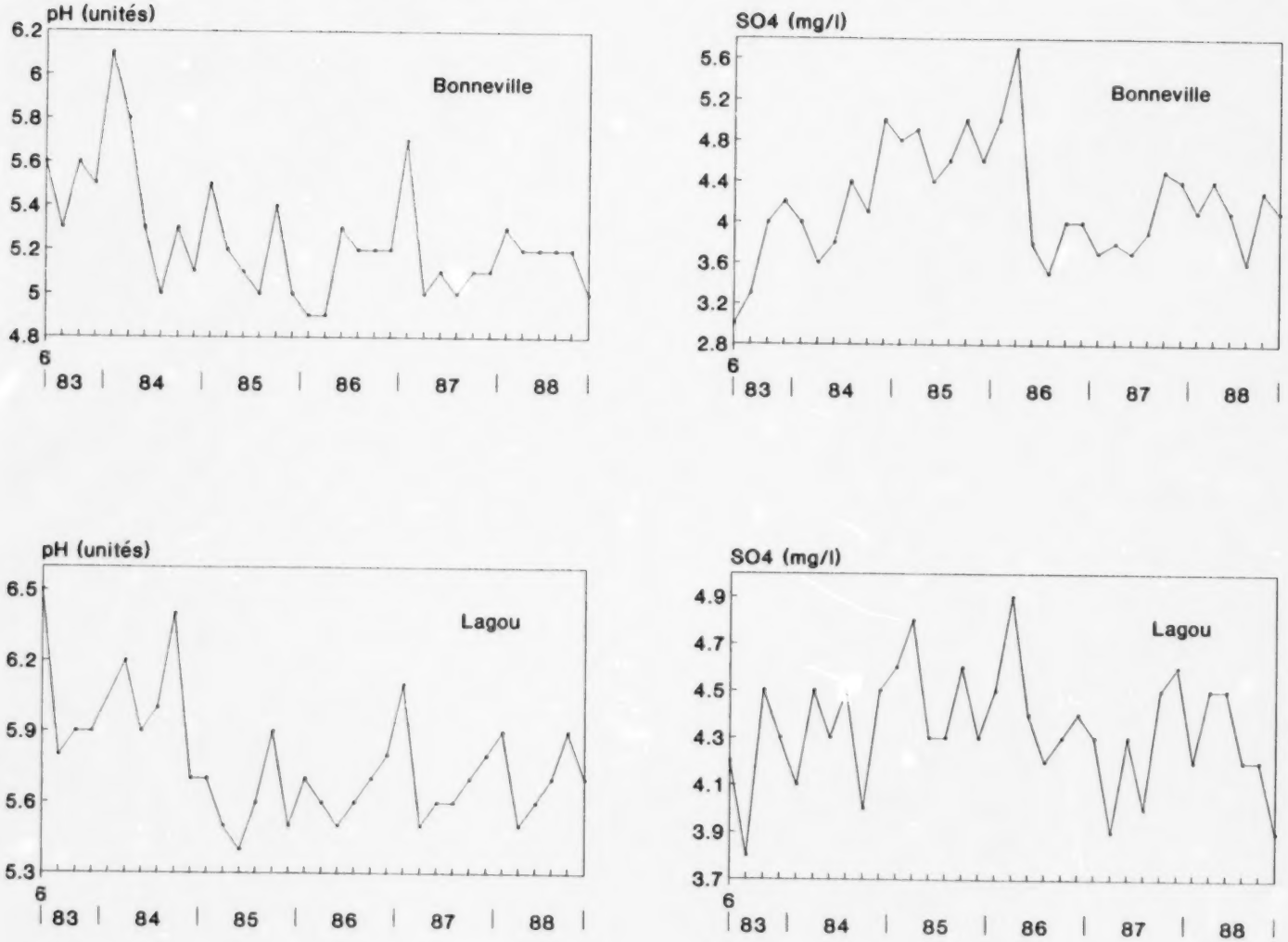


Figure 22: Évolution du pH et des sulfates de l'eau des lacs Bonneville et Lagou

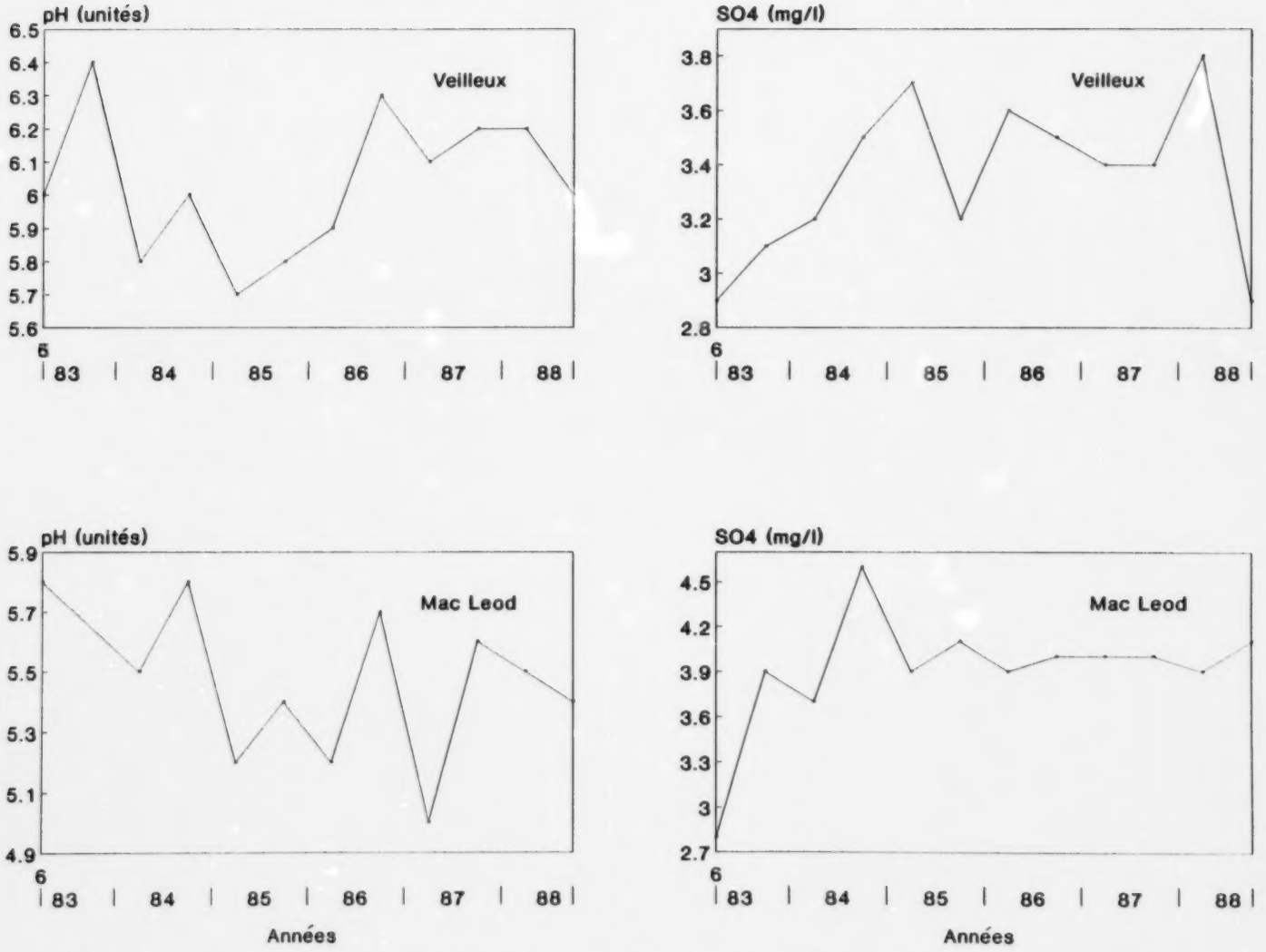


Figure 23: Évolution du pH et des sulfates de l'eau des lacs Veilleux et McCleod

Tableau 18. Apport acidifiant et capacité de neutralisation des lacs TADPA avoisinants

NOM	Changement de pH	Changement d'alcalinité ($mgCaCO_3/l$)	VOL. lac ($10^8 l$)	MASSE HCO_3 (keq)	APPORT H^+ (keq)
Bonneville	5,5 à 4,9	1,63 à -0,16	4,5	16,1	56,8
McCleod	5,8 à 5,0	1,79 à -0,17	5,1	19,1	56,2
Lagou	5,8 à 5,4	0,92 à 0,08	13,0	26,0	85,7
Josselin	5,8 à 5,5	1,13 à 0,13	18,6	45,0	72,2
Veilleux	6,0 à 5,7	1,98 à 1,0	5,6	22,7	19,7

calculé que les retombées de sulfates dans les précipitations pourraient être responsables d'une acidification moyenne de 0,59 ± 0,28 unité de pH dans les lacs de la région hydrographique 5. Egalement selon le modèle, une norme maximale de 15 kg/ha/an permettrait de récupérer tous les lacs acides (pH < 5,5) de cette région et permettrait de récupérer 91,9% des lacs qui ne peuvent maintenir un pH de 6.

Lors d'une étude paléolimnologique effectuée en 1986 (Dixit et al., 1987), la chimie (SO_4) et le changement dans les assemblages de diatomés et de chrysophycées dans les sédiments du lac Bonneville semblaient même indiquer que l'acidification du lac remontait aux alentours de 1945. Au lac Lagou, il n'y avait pas de changement dans les assemblages de diatomés mais les changemenents importants dans les chrysophycées seraient indicatives d'une acidification récente du lac (1970). Les niveaux de métaux (Pb, Ni, Zn, Cd) et de sulfates avaient augmenté dans les sédiments récents.

Lorsque la qualité des précipitations s'est améliorée en 1986 et 1987, des changements importants ont eu lieu dans l'eau du lac Laflamme. Les diminutions de nitrates et de l'acidité se sont accélérées (figure 24). Une diminution du calcium et une augmentation de la couleur ont également été notées. Les concentrations de sulfates ont diminué un peu.

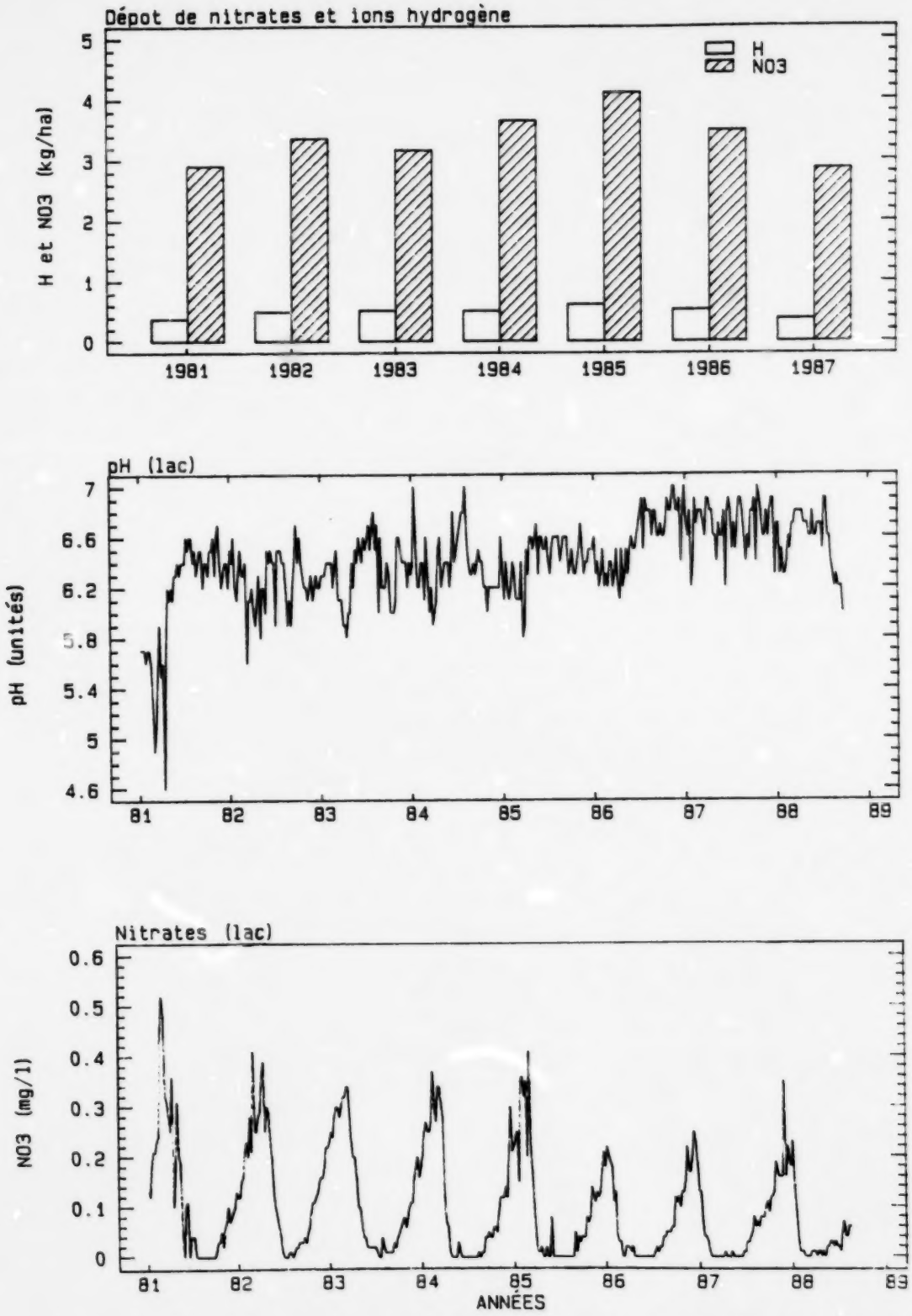


Figure 24: Dépôts atmosphériques de l'ion hydrogène et des nitrates et leurs concentrations dans l'eau du lac Laflamme

Les concentrations de sulfates ont également diminué dans les lacs avoisinants après 1985 sans descendre aux niveaux de 1983. Il semble avoir eu un effet de tamponnage des diminutions de sulfates dans ces bassins aussi. La diminution de sulfates correspond cependant à l'ordre de grandeur attendue par une diminution des charges de sulfates de 23 à 18 kg/ha. Aux lacs Bonneville et McCleod, la diminution théorique serait d'environ 1 mg/l alors qu'aux lacs Lagou et Veilleux, la diminution serait plus proche de 0,6 et 0,3 mg/l respectivement. La période à laquelle ces diminutions se sont produites semble dépendre du temps de résidence de l'eau dans le bassin. Ainsi, aux lacs Bonneville et Lagou, les minimums ont été notés en août 1986 (3,5 mg/l) et en avril 1987 (3,9 mg/l) respectivement.

Les changements du degré d'acidification sont beaucoup plus importants dans les bassins avec une réserve d'alcalinité que dans les autres. En 1986, les pH des lacs Veilleux et Josselin semblent avoir augmenté alors que dans les trois autres lacs, le pH ne récupère pas.

Statistiquement pour la période complète de cinq ans des deux lacs échantillonnés six fois par année (N=30), il a y eu des diminutions significatives du pH et de l'alcalinité. Au lac Lagou, une augmentation significative des nitrates a également été notée (Haemmerli, com. pers.).

Tendances temporelles de 1983 à 1988

Paramètre	Bonneville	Lagou
pH, alcalinité	Diminution	Diminution
Nitrates	---	Augmentation
Paléolimnologie	Acidification (1945)	Acidification (1970)

6. BILAN D'EAU ET DE MASSE DU BASSIN VERSANT

6.1 Bilan d'eau

Dans les cas les plus simples, l'apport d'eau principal à un lac de tête est composé des précipitations brutes (Pb) et les sorties principales sont l'évaporation (E) et l'écoulement à l'exutoire (R). Toutefois, les apports égaleront les sorties seulement si les changements de stockage dans le bassin versant sont négligeables. En compilant le bilan sur une année hydrologique commençant le 1er juin, le couvert de neige est complètement fondu et les eaux de fonte ont rechargées le sol. Les variations dans le stockage de l'eau dans le sol et le couvert de neige peuvent donc être négligées dans les calculs. Au lac Laflamme, les pertes d'eau via le réseau d'écoulement souterrain (ST) doivent aussi être incluses dans le bilan gobal:

$$Pb = R + E + ST + \delta$$

où δ représente l'incertitude expérimentale. Les paramètres qui ont été mesurés sur une base régulière sont les précipitations, les fractions de pluie et de neige, le débit à l'exutoire, le niveau du lac et l'évaporation en bac.

6.1.1 Précipitations brutes et écoulement

Les précipitations brutes sur le bassin sont calculées à partir des mesures à la station RECPA/CAPMoN. La moyenne annuelle pour sept ans est de 1,3 m ou 8,9 x 10^5 m^3 d'eau. Cette quantité représente plusieurs fois le volume du lac. L'écoulement annuel à l'exutoire représente en moyenne 64,3 % des précipitations brutes avec une variation de 56 à 71% (figure 4).

Sur une base saisonnière, l'écoulement est toujours inférieur aux précipitations durant l'hiver (28%), l'été (57%) et l'automne (50%) (figure 25). Au printemps par contre, l'écoulement représente en moyenne 150 % des précipitations sauf en 1983 où les deux composantes sont presqu'équivalentes.

Les hydrogrammes et les précipitations de 1981 à 1988 sur une base hebdomadaire sont présentés aux figures 26 et 27. La crue de 1986 a été très forte (0,35 m3/s).

6.1.2 Bilan détaillé

Pour le bilan détaillé, plusieurs des paramètres hydrologiques ne sont pas mesurés directement mais plutôt estimés. L'année hydrologique de 1983-84 servira comme exemple de la quantification du cheminement de l'eau dans le bassin car les précipitations et l'écoulement sont près de leurs moyennes (figure 28).

Après avoir divisé les précipitations en pluie et en neige, les pluies sont redivisées en pluie tombant directement sur le lac (P_L), en pluie en sous-bois (P_s), en écoulement le long des fûts (P_f) et en interception (I). L'attribution des volumes à ces composantes se base sur valeurs mesurées en 1981 et 1982. De la composante neige, l'évaporation (E_l) est enlevée. Ainsi, près de 72% des précipitations brutes ($6,42 \times 10^5$ m^3) arrivent au sol forestier. Il y a peu de données sur l'évaporation au niveau du sol.

Les estimations les plus difficiles du cheminement de l'eau ont lieu dans la zone de recharge où l'eau se partage entre le ruisellement de surface, l'écoulement peu profond (hypodermique) et les eaux souterraines.

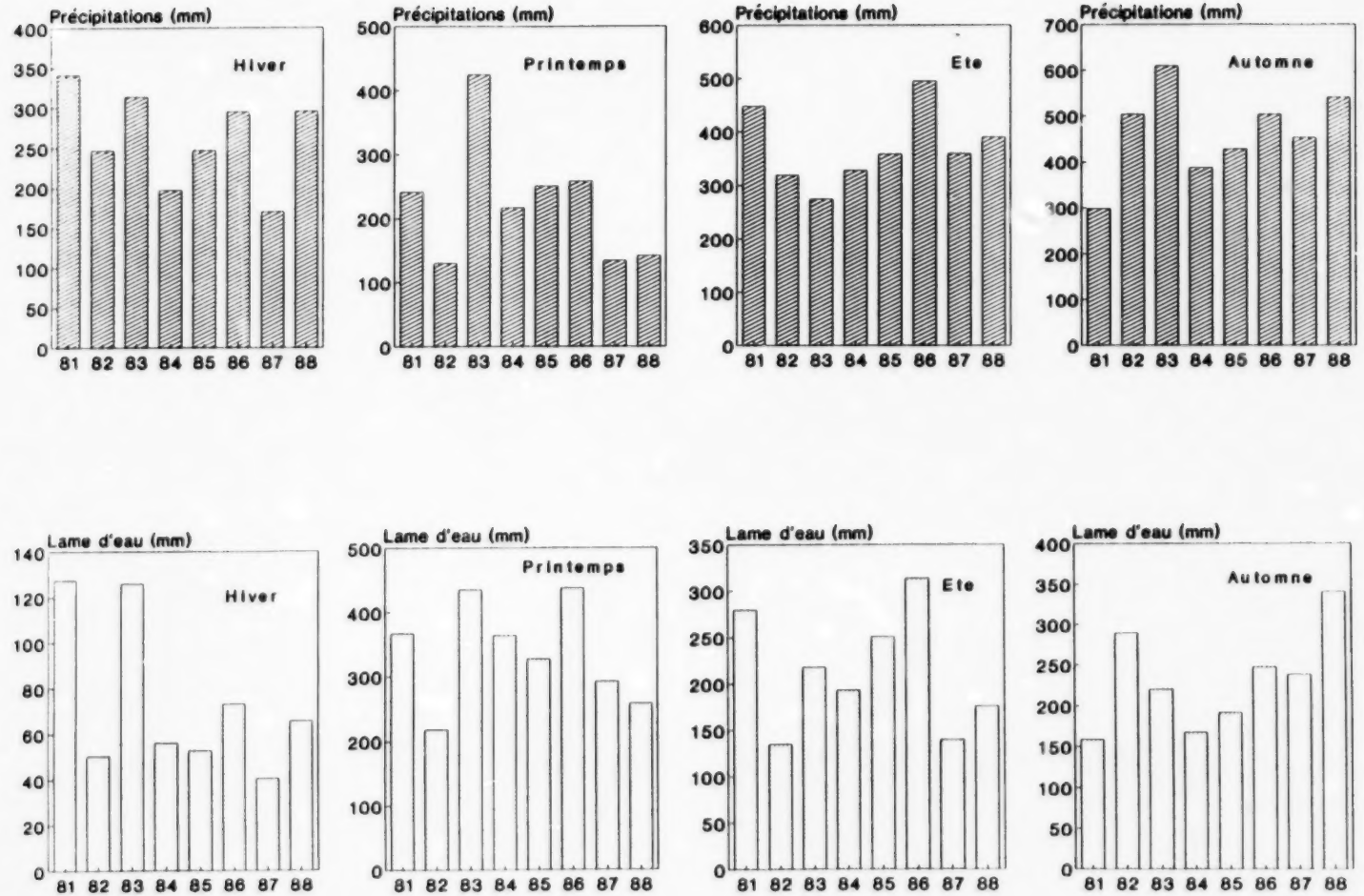


Figure 25: Précipitations et écoulements par saisons au lac Laflamme

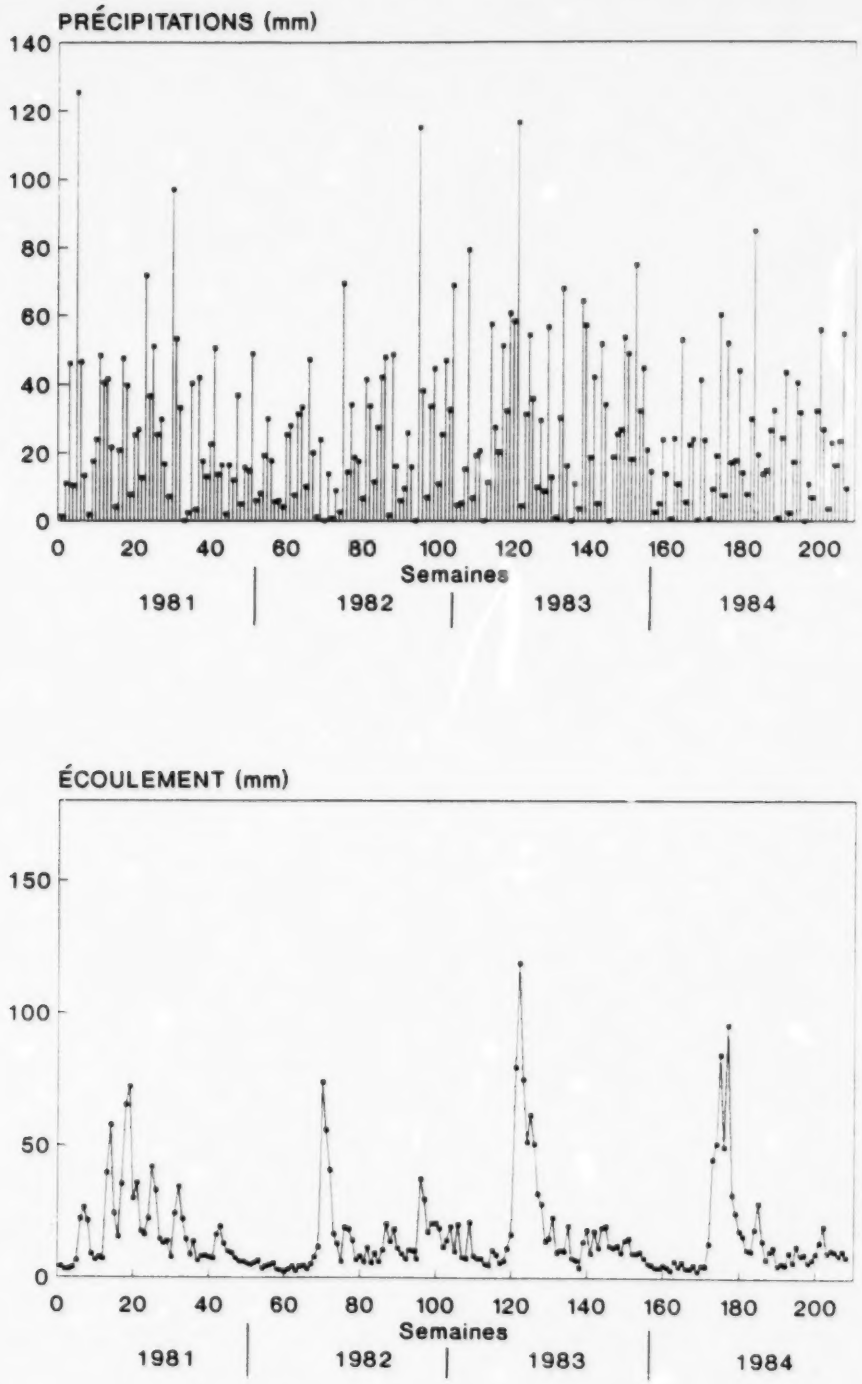


Figure 26: Précipitations et hydrogrammes hebdomadaires de 1981 à 1984

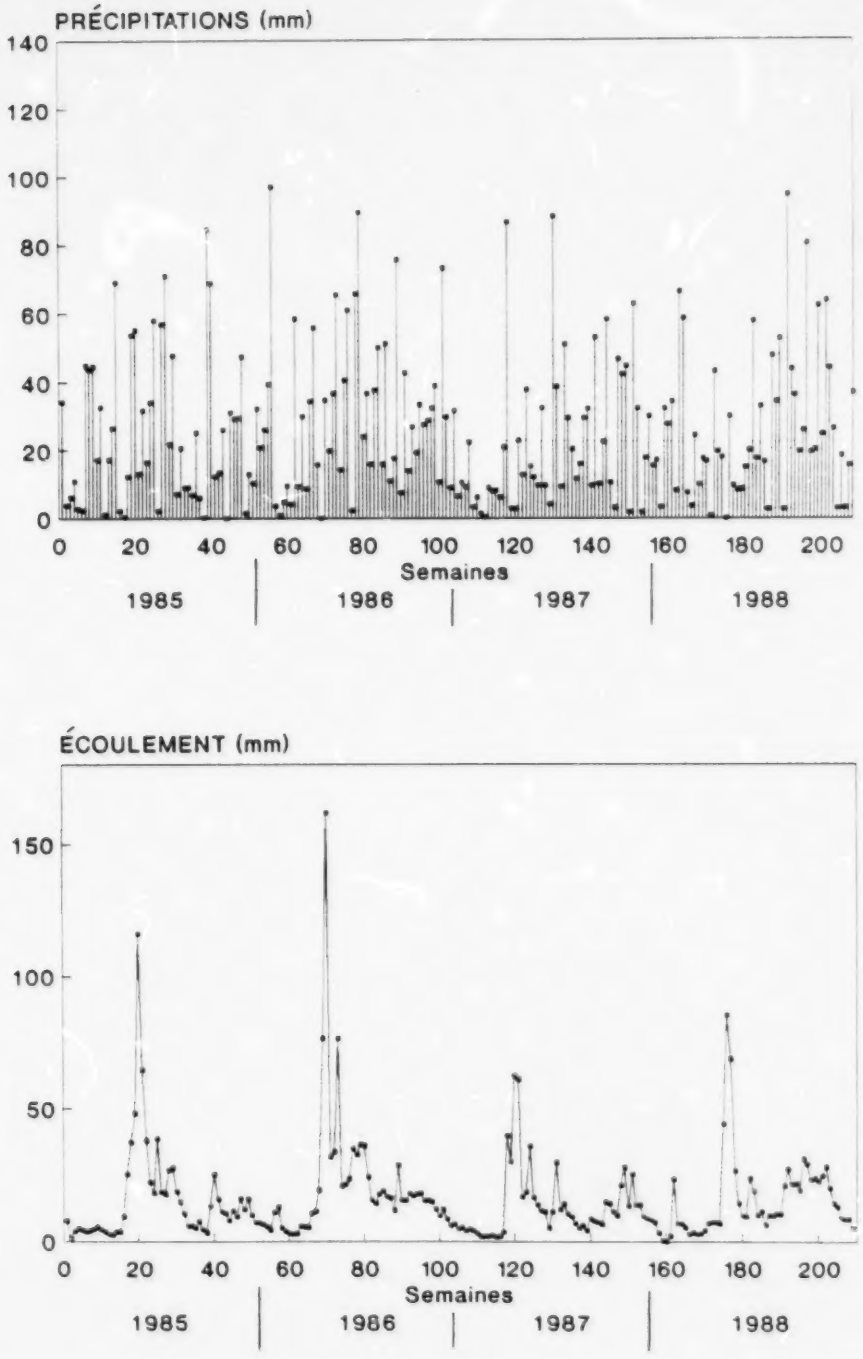


Figure 27: Précipitations et hydrogrammes hebdomadaires de 1985 à 1988

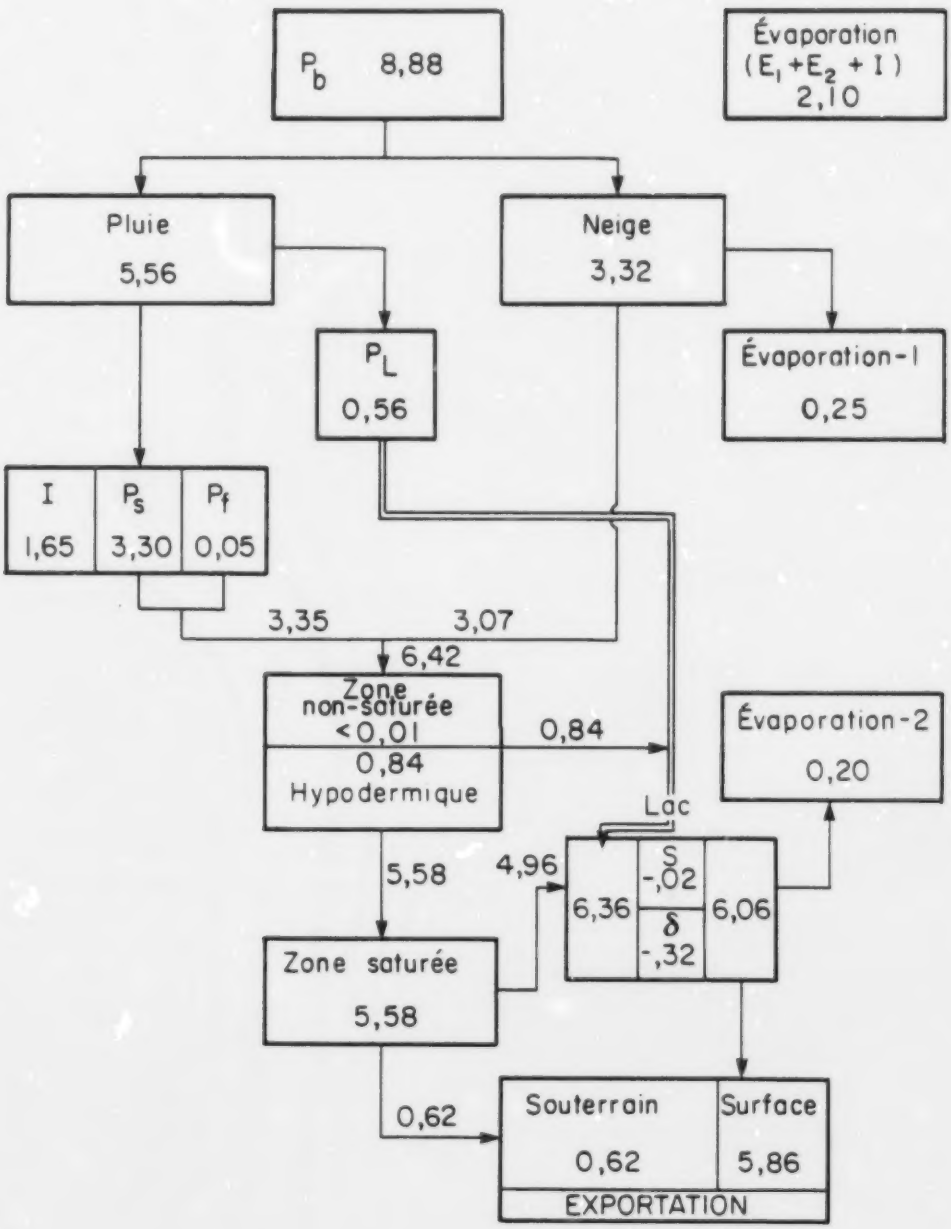


Figure 28: Bilan hydrique du bassin du lac Laflamme
Juin 1983 - Mai 1984 (Volume d'eau 10^5 m^3)

Plusieurs facteurs indiquent qu'il y a une importance qualitative de la charge du lac par les eaux souterraines sur une base annuelle. La nature de la topographie locale, la nature et la perméabilité des dépôts meubles ainsi que la quasi-inexistance d'un réseau de drainage de surface tendent à indiquer que la recharge du lac est principalement souterraine (Azzaria et al., 1982). La plupart des sols dans les régions humides ont une grande capacité d'infiltration due à l'abondance de la couche d'humus, ce qui indique que le ruissellement sera à toutes fins pratiques inexistant dans les périodes sans gel. Aussi longtemps que la nappe souterraine est sous la surface du sol, toute l'eau qui tombe sur le sol peut s'infiltrer.

L'hydrogramme à l'exutoire démontre des augmentations rapides mais des diminutions plus graduelles, ce qui indique que les précipitations percolent dans les horizons plus profonds du sol. Egalement, la qualité de l'eau du lac est semblable à la qualité de l'eau souterraine durant la plus grande partie de l'année sauf lors de forts débits.

Les mesures de débits indiquent que 60 % de l'écoulement a lieu sous des conditions de recharge souterainne. Toutefois, l'autre partie de l'écoulement annuel a lieu en avril et mai quand l'eau peut être redirigée vers des types d'écoulement avec des temps de contact rapides ou nuls avec les composantes neutralisantes du sol et des dépôts meubles.

Durant la fonte de 1983, Padilla et al. (1983), avec une technique de séparation de l'hydrographe, ont trouvé que la contribution de l'eau souterraine n'avait pas descendu à moins de 67 % durant la fonte. Pendant la crue, au début de mai, la recharge provenait à 74% des eaux souterraines et à

26 % du ruissellement. Des études de Roberge (1987), confirment l'importance de l'eau souterraine dans la recharge du lac au printemps de 1984 (tableau 11).

Ainsi, annuellement, la recharge du lac proviendrait approximativement à 78% des eaux souterraines, à 13% des eaux hypodermiques et à 9% des apports directs au lac des précipitations brutes. Une fois dans la cuvette lacustre, l'évaporation est d'environ 0,17 x 10^5 m^3 ou 28 cm. La différence entre le niveau le plus haut du lac et le niveau le plus bas est de 0,29 m.

Les pertes sous le lac, par voies souterraines, ont été estimées à partir de quelques piézomètres par Robitaille et al. (1983). L'écoulement a été estimé à 54,2 m^3/jour ou dans des conditions extrêmes à 126,4 m^3/jour (5% de Pb). Deschesnes et Villeneuve (1983) ont appliqué un modèle hydrologique couplé (surface et eaux souterraines) aux données du bassin et ont calculé que 7% de Pb s'écoulaient sous le lac. L'exportation souterraine a donc été estimée à 7% des préciptations brutes dans le bilan d'eau du bassin.

6.2 Bilans chimiques

Les apports à un lac de tête se limitent généralement aux appports atmosphériques (humides, secs et sous forme de brume). Au lac Laflamme, les apports humides sont obtenus en cumulant le produit du volume journalier des précipitations par la concentration de chaque espèce d'ion pour cet échantillon. Un ajustement mensuel est effectué pour tenir compte des précipitations qui n'ont pas été analysées.

L'exportation de matériel a lieu via l'écoulement de surface (ruisseau) et l'écoulement souterrain.

L'exportation du ruisseau est le produit de l'écoulement hebdomadaire par la concentration moyenne de la semaine. Pour la période avant qu'il n'y ait d'échantillonnage au ruisseau, les valeurs du lac sont employées pour les calculs.

6.2.1 Les apports atmosphériques

Les apports atmosphériques humides reçus au lac de 1981 à 1987 sont de 21 kg/ha/an de sulfates (21,6 mmol/m^2), de 0,49 kg/ha/an d'ion hydrogène (49 mmol/m^2) et 3,37 kgN/ha de nitrates (24,1 mmol/m^2) (tableau 19, figures 29 à 31).

Les périodes d'apports élevés en sulfates étaient de mai à août 1981 (10,1 kg/ha), en mars et avril 1982 (4,6 kg/ha), en novembre et décembre 1982 (6,0 kg/ha), de mai à juillet 1983 (10,5 kg/ha) et de mai à juillet 1984 (10,2 kg/ha), d'avril à juillet 1985 (15 kg/ha) et de mai à juillet 1986 et 1987. Ceci indique que presque la moitié des apports atmosphériques annuels est reçue en trois à quatre mois. En juillet 1984 et en mai 1985, plus de 5 kg/ha de sulfates ont été reçus dans un seul mois.

Les charges atmosphériques de l'ion hydrogène, tout comme celles des sulfates, démontrent de la saisonnalité (tableau 20). Bien que les charges de l'ion hydrogène varient comme les charges de sulfates, elles sont toutefois influencées par les dépositions fortes de nitrates durant certains mois de l'hiver.

Les apports de nitrates ne démontrent pas de saisonnalité. Les périodes des fortes charges (1,1 kgN/ha) ont eu lieu en novembre et décembre 1982 et 1984 et au printemps 1985. Au mois de novembre 1982, la charge mensuelle de nitrates a atteint 0,68 kgN/ha.

TABLEAU 19

Charges annuelles des paramètres de qualité
dans les précipitations au lac Laflamme (kg/ha)

An	Volume (m)	SO_4	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	Cl	Ca	Na	H^+	K	Mg
81	1,37	19,4	2,91	1,77	1,12	1,25	1,22	0,38	0,27	0,19
82	1,24	21,1	3,36	1,74	2,11	0,93	1,07	0,50	0,22	0,13
83	1,67	24,0	3,17	2,44*	2,94*	1,91	0,77*	0,52	0,39	0,26
84	1,16	23,2	3,66	2,27	1,99*	1,55*	0,71*	0,51	0,30	0,27
85	1,32	23,1	4,12	2,32	1,35	1,15	0,39	0,62	0,21	0,21
86	1,60	18,4	3,49	2,30	0,90	0,83	0,34	0,53	0,20	0,19
87	1,15	16,5	2,86	2,01	0,60	0,68	0,29	0,38	0,21	0,14
MOY	1,36	20,8	3,37	2,12	1,57	1,19	0,69	0,49	0,26	0,20

* RESULTAT PARTIEL

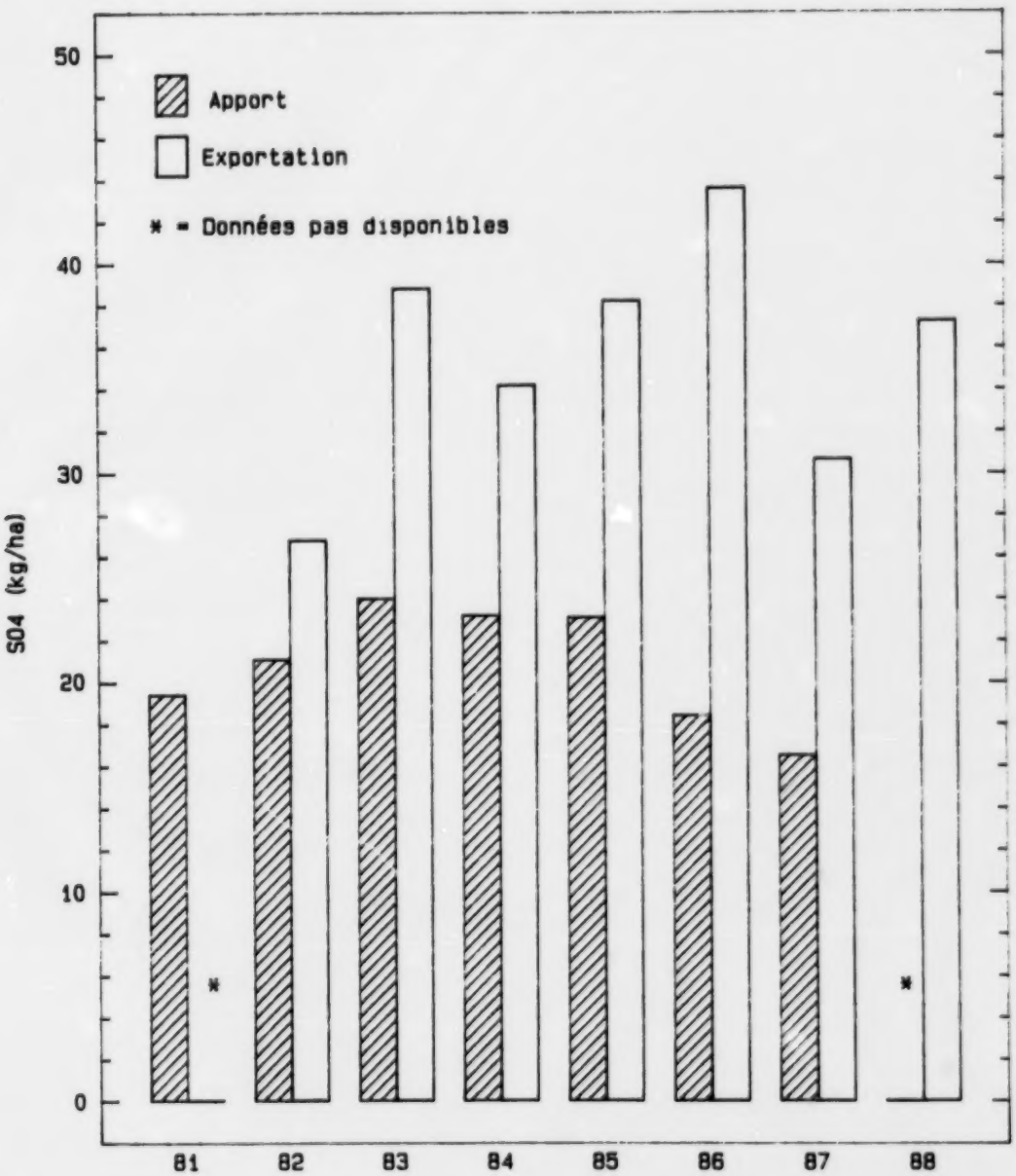


Figure 29: Bilan ionique annuel des sulfates

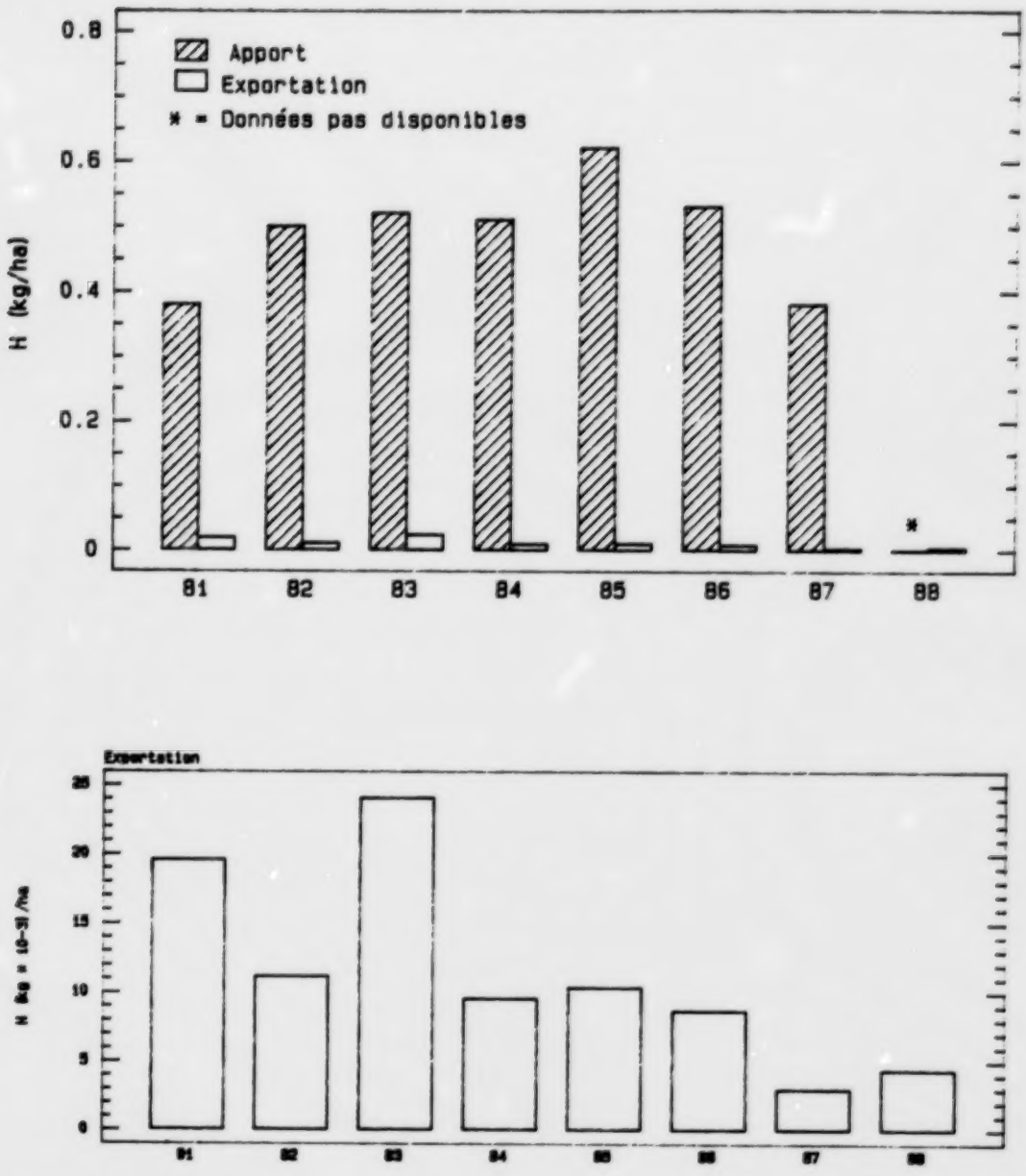


Figure 30: Bilan ionique annuel de l'ion hydrogène

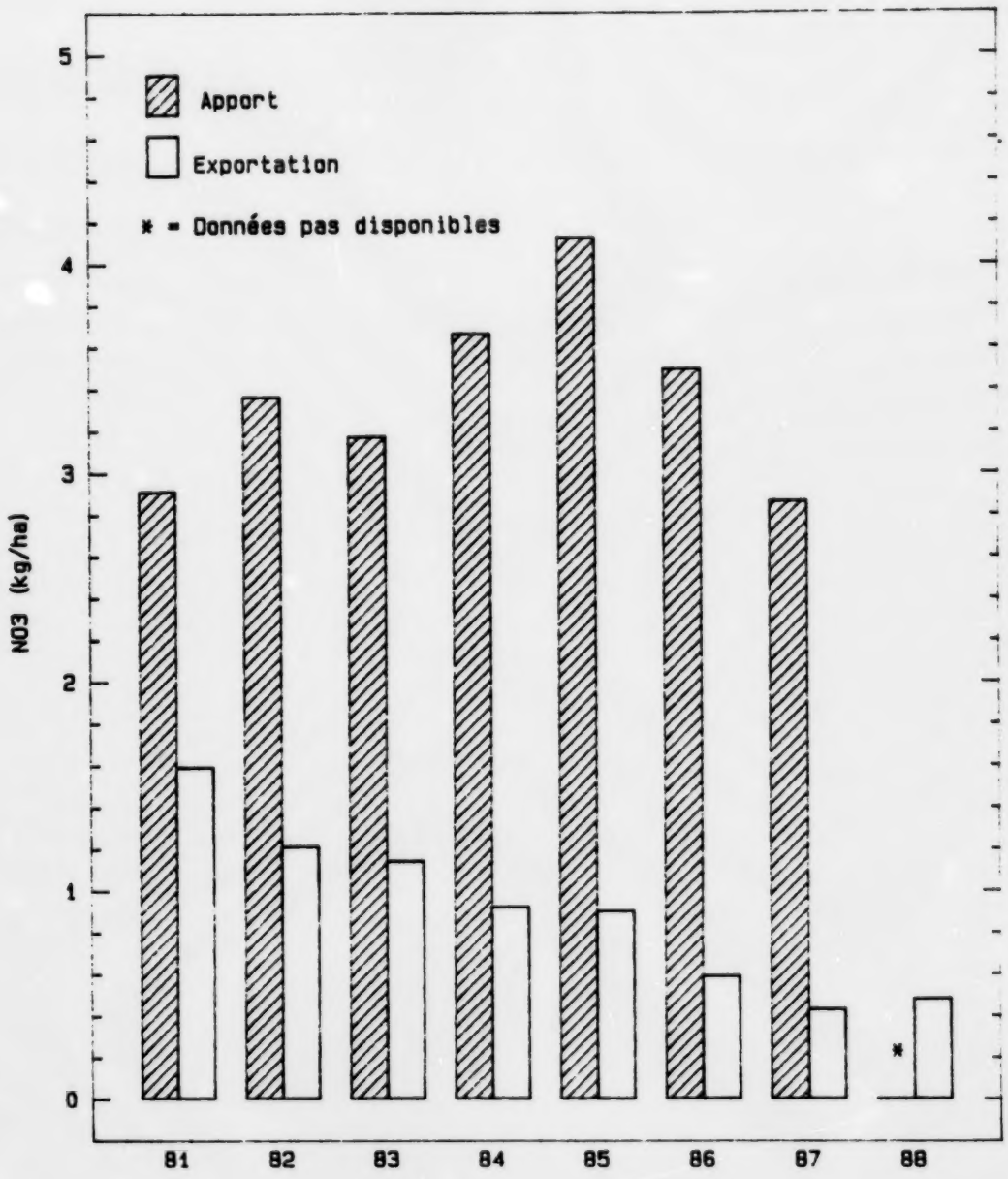


Figure 31: Bilan ionique annuel des nitrates

TABLEAU 20

Charges saisonnières des composantes principales des précipitations (kg/ha)

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
HIVER (janvier à mars)							
H	0,071	0,097	0,061	0,096	0,111	0,100	0,044
SO4	3,28	2,85	1,81	3,21	2,36	3,15	1,24
NO3-N	0,85	0,92	0,48	0,94	1,00	1,00	0,36
NH4-N	0,43	0,19	0,11	0,35	0,22	0,53	0,15
PRINTEMPS (avril, mai)							
H	0,074	0,100	0,155	0,074	0,215	0,093	0,061
SO4	4,58	3,91	6,43	4,38	9,00	3,44	3,48
NO3-N	0,66	0,41	0,75	0,45	1,12	0,46	0,44
NH4-N	0,45	0,31	0,49	0,60	0,87	0,36	0,48
ÉTÉ (juin à août)							
H	0,132	0,099	0,138	0,163	0,202	0,161	0,129
SO4	7,32	5,57	7,24	8,88	15,09	6,25	6,483
NO3-N	0,65	0,63	0,61	0,77	1,41	0,69	0,64
NH4-N	0,58	0,58	0,83	0,72	1,31	0,72	0,60
AUTOMNE (septembre à décembre)							
H	0,097	0,208	0,164	0,178	0,148	0,177	0,148
SO4	4,21	8,81	8,48	6,77	4,61	5,52	5,31
NO3	0,75	1,40	1,32	1,50	1,14	1,34	1,42
NH4-N	0,31	0,67	1,02	0,60	0,44	0,69	0,77

Les apports de l'ion ammonium ont été en moyenne de 2,1 kgN/ha de 1981 à 1987 (figure 32) et possèdent approximativement la même saisonnalité que ceux des sulfates.

Les apports des chlorures (figure 32) et du calcium ont augmenté brusquement lors du passage du réseau APN au réseau RCEPA/CAPMoN en juillet 1983 ce qui est probablement lié à des nouvelles procédures de validation des données. De plus, les données de l'ion ammonium, des chlorures, du calcium et du sodium n'étaient pas toujours complètes en 1983 et 1984.

Tout comme pour les concentrations, il y a eu des diminutions dans les charges de sulfates, de nitrates et de l'ion hydrogène après 1985. La charge maximale de sulfates pour une période de douze mois a été mesurée de juillet 1984 à juin 1985 et était de 28 kg/ha. Par après, la charge a diminuée pour passer sous 20 kg/ha en mai 1986. Pour la période de sept ans, les charges de sulfates démontrent une tendance décroissante (1,85 à 1,63 kg/ha/mois).

Tendance temporelle pour les charges atmosphériques

Paramètre	Test	1981 - 1985	1981 - 1987
H^+	Kendall Sais.	Non	Non
SO_4	Kendall Sais.	Non	Diminution
NO_3	Kendall	Augmentation	Non
NH_4	Kendall Sais.	Non	Non

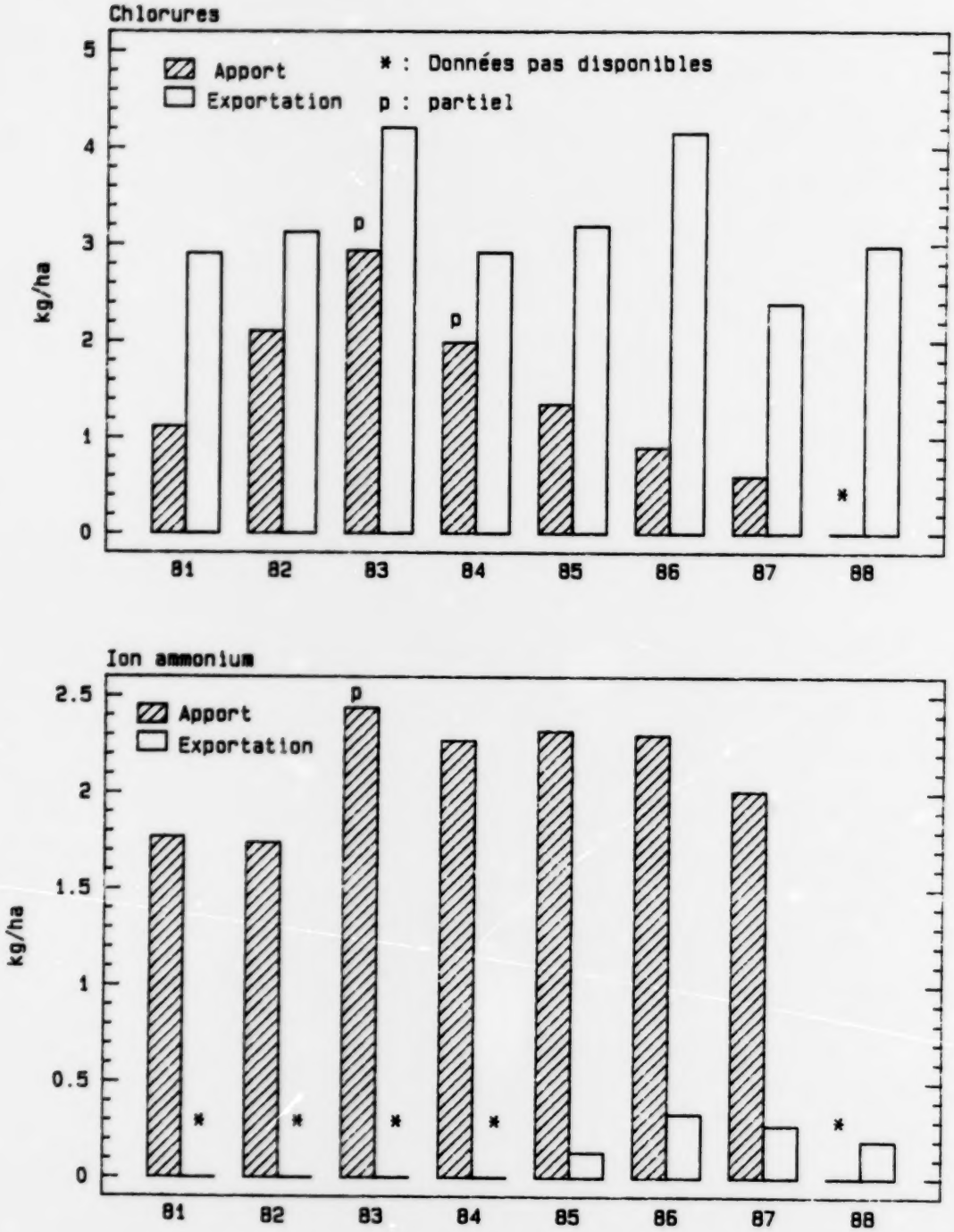


Figure 32: Bilan ionique annuel des chlorures et de l'ion ammonium

Les tests non paramétriques n'ont pas détecté de tendances dans les charges mensuelles de l'ion hydrogène et de l'ion ammonium. Une tendance croissante dans les apports de nitrates a été détectée pour la période de 1981 à 1985.

Contrairement aux dépôts humides, les dépôts secs ne sont pas mesurés directement mais ils sont obtenus par le produit de la concentration moyenne journalière dans l'air, du coefficient du taux de déposition sèche et la durée moyenne. Les concentrations moyennes de SO_2 et de sulfate particulaire dans l'air à la Forêt Montmorency sont de 1,05 $\mu gS/m^3$ et de 0,59 $\mu gS/m^3$ respectivement.

Une étude sur la déposition sèche pour l'est du Canada (Barrie et Sirois, 1986) indique que pour une déposition annuelle totale de 10 à 86 mmole/m^2 de sulfates (9,6 à 83 kg/ha) et de 13 à 62 mmole/m^2 de nitrates (1,8 à 8,7 kgN/ha), seulement en moyenne 22% des dépôts totaux de sulfates et 30% des dépôts totaux de nitrates provenaient de la déposition sèche. Des six sites étudiés, la contribution des dépôts secs au total des dépôts de soufre était la plus faible à la Forêt Montmorency (14%). La contribution des dépôts secs de nitrates sans inclure le NO_2 était de 17% du total des dépôts (tableau 21).

Tableau 21. Contribution des dépôts secs à la déposition totale à la Forêt Montmorency

Année	Total SO_4 kg/ha	sec %	Total NO_3 kgN/ha	sec %
1981	24	16	3,6	20
1982	26	12	3,9	15

A l'échelle de la province, les dépôts humides de sulfates en 1986 variaient de 4,5 kg/ha (Schefferville) à 39,5 kg/ha (Mont Mégantic) et 40,6 kg/ha (Montébello) (figure 33). Le même gradient est-ouest que dans les concentrations de sulfates existe pour les charges atmosphériques. La moyenne des charges des 37 stations était de 21 kgSO_4/ha.

Une quinzaine de stations ont été echantillonnées pendant cinq ans (tableau 22). Pour ces stations, les apports atmosphériques en 1986 sont à leurs niveaux les plus bas en cinq ans à Notre-Dame-du-Lac, à la Forêt Montmorency, à Joutel, à Chapais, à Rapide-des-Joachims, à Hémon et à Fermont. Par contre au Mont Mégantic, à Duparquet, à St-Hyppolyte et à Ste-Catherine, il ne semble pas y avoir d'indication de diminution des apports en 1986.

6.2.2 Exportations à l'exutoire

La masse de substances exportées du bassin versant est quatre fois supérieure à celle des apports atmosphériques humides. Le calcium (17 kg/ha), les sulfates (36 kg/ha) et les bicarbonates (29 kg/ha) contribuent à 83 % de la masse exportée (tableau 23, annexe 5, figures 29, 34, 35). Sept paramètres (Na, Mg, Cl, K, NO_3, Al, Fe) ont des niveaux d'exportation entre 1 et 7 kg/ha (figures 31, 32, 34, 35). Le manganèse, le phosphore, le zinc et l'ion hydrogène sont exportés à moins de 0,5 kg/ha par année (figures 30, 35).

En 1986, les exportations de sulfates, de cations majeurs, d'aluminium et de manganèse ont atteint leurs maximums pour les huit ans. Pour l'alcalinité, les chlorures, le potassium, le fer et l'ion hydrogène, les maximums ont été mesurés en 1983. Les deux éléments nutritifs (NO_3, P) ont des exportations maximales la première année soit en 1981.

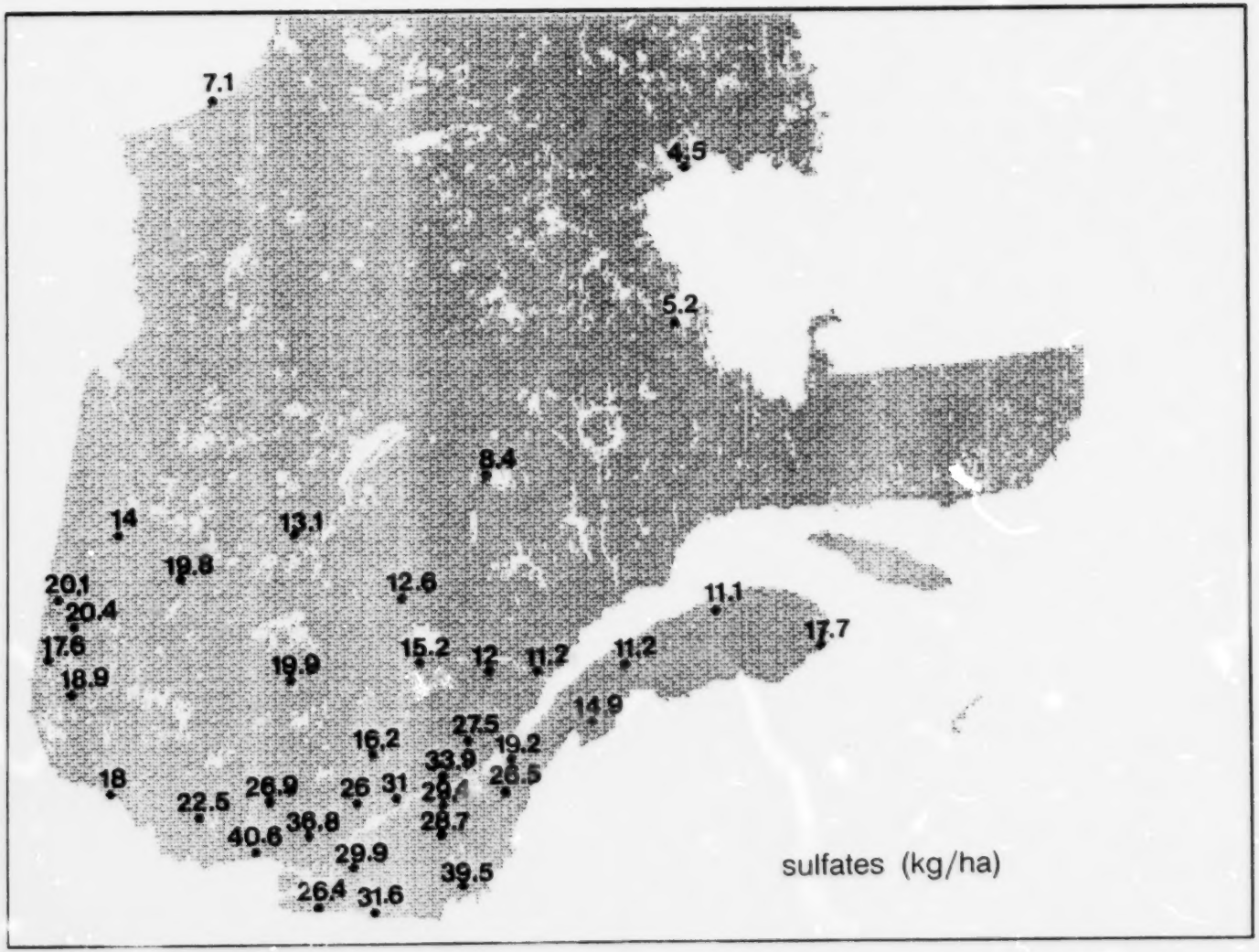


Figure 33: Dépôts humides des sulfates au Québec en 1986

TABLEAU 22

Dépôts atmosphériques de sulfates (kg/ha)
pour 15 stations du REPQ

STATION	1982[1]	1983[1]	1984[2]	1985[3]	1986[4]
Le long du St-Laurent					
Mont Mégantic	42,6	30,6	28,0	29,5	39,5
Saint-Flavien	24,3	29,0	28,1	33,1	29,4
Notre-Dame-du-Lac	18,0	18,6	15,1	16,2	14,9
Saint-Hyppolyte	26,9	35,1	27,5	20,8	36,8
Sainte-Catherine	47,0	34,0	30,2	30,1	33,9
Forêt Montmorency	29,5	27,8	27,5	29,1	24,5
Influencée par Rouyn					
Mont-Brun	28,2	26,0	26,6	22,6	24,9
Rivières Kinojevis	28,8	18,2	23,3	22,6	20,4
Duparquet	20,2	20,4	18,7	22,9	20,1
Lebel-sur-Quévillon	24,4	22,9	16,7	21,7	19,8
Joutel	22,8	18,0	17,8	20,2	14,0
Chapais-2	22,4	15,9	15,1	16,8	13,1
Rapides-des-Joachims	21,4	25,4	31,8	23,8	18,0
Région avec <20 kg/ha					
Hémon	19,3	19,2	17,4	19,3	12,6
Fermont	8,5	9,0	7,4	5,9	5,2

1. Grimard, 1984
2. Grimard, 1985
3. Jacques et Grimard, 1987
4. Jacques et Boulet, 1988

TABLEAU 23

CHARGES ANNUELLES EXPORTEES A L'EXUTOIRE (KG/HA)

	81	82	83	84	85	86	87	88	Moy
SO_4	-----	26,80	38,82	34,18	38,21	43,59	30,64	37,23	35,64
Alc	28,75	31,37	33,44	25,45	29,87	31,29	27,03	27,47	29,33
Ca	19,57	15,74	18,07	15,03	16,72	20,23	14,04	16,49	16,99
Na	6,94	5,82	6,50	5,74	6,12	7,29	5,81	6,43	6,33
Mg	3,93	3,06	3,59	3,23	3,46	4,46	3,10	3,59	3,55
Cl	2,91	3,13	4,21	2,92	3,19	4,15	2,39	2,98	3,24
K	1,53	1,55	4,38	1,16	2,00	2,74	0,99	1,36	1,96
NO_3	1,59	1,21	1,14	0,92	0,90	0,59	0,43	0,48	0,91
Al	1,07	1,08	0,83	0,65	1,11	1,42	0,87	0,88	0,99
Fe	0,84	0,80	1,09	0,89	0,98	1,07	0,81	0,97	0,93
Mn	0,21	0,13	0,24	0,15	0,19	0,27	0,11	0,14	0,18
P	0,40	0,26	0,27	0,22	0,28	0,36	0,22	----	0,29
Zn	0,04	0,02	0,04	0,03	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04
H	0,020	0,011	0,024	0,010	0,010	0,009	0,003	0,004	0,011

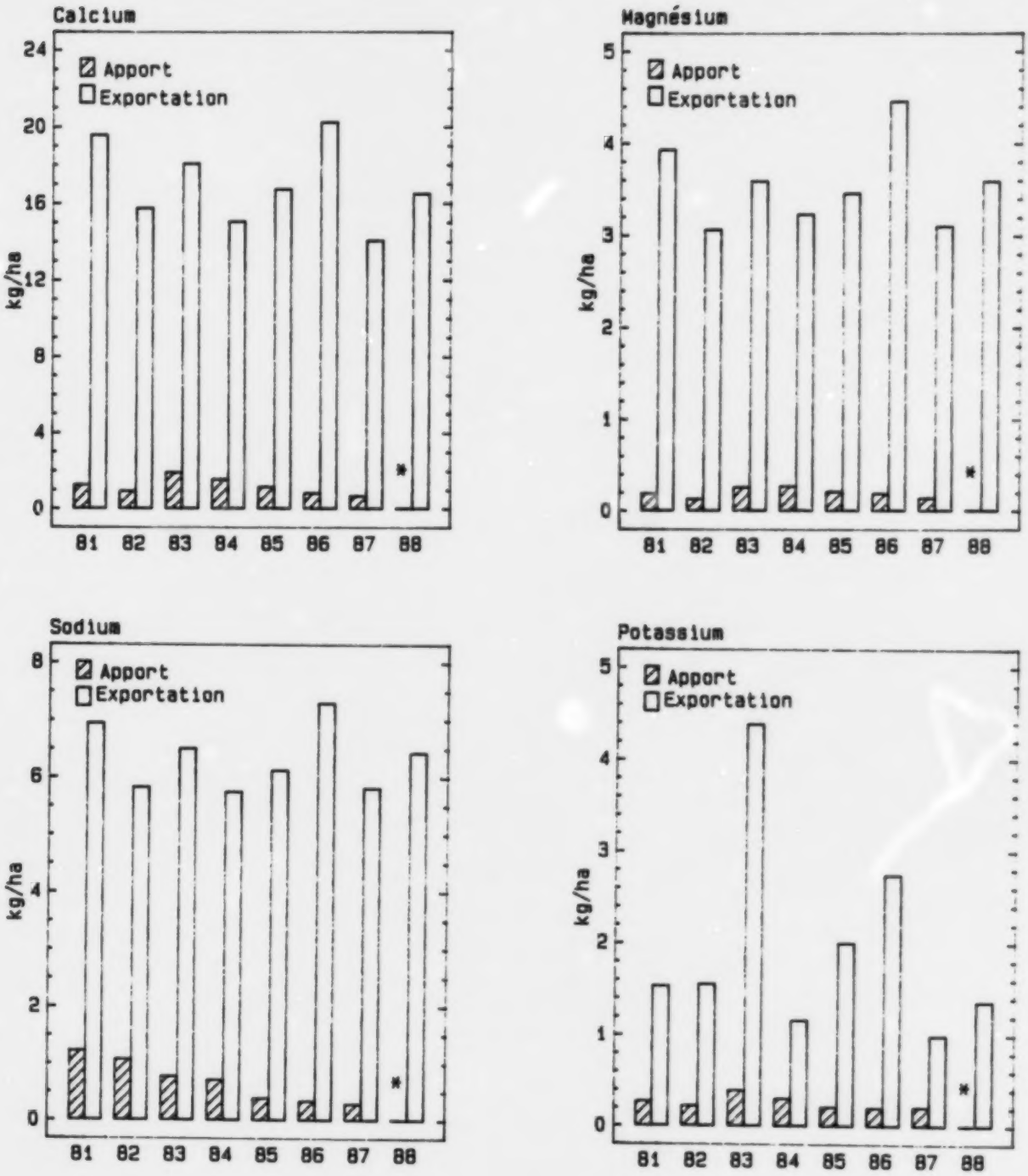


Figure 34: Bilan ionique annuel du calcium, du magnésium, du sodium et du potassium

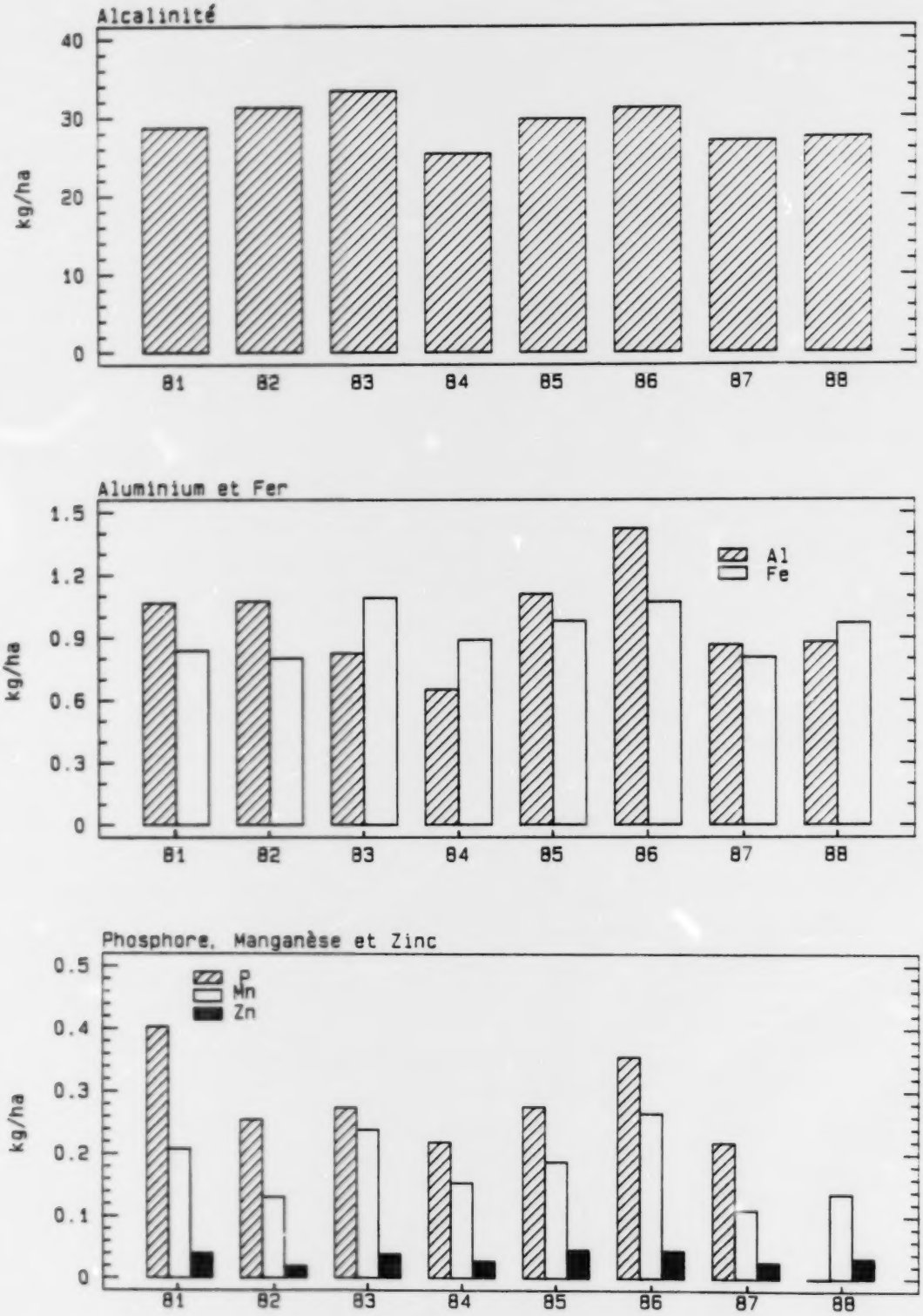


Figure 35: Exportations de l'alcalinité, de l'aluminium, du fer, du phosphore, du manganèse et du zinc

Toutes les séries d'exportations mensuelles démontrent de la saisonnalité. Les exportations reflètent beaucoup les variations du débit sauf pour les nitrates, l'ion hydrogène et le potassium. Les exportations maximales pour tous les paramètres ont lieu au printemps (avril ou mai). Les exportations minimales ont généralement lieu en hiver sauf pour les nitrates (minimum l'été). Une exception importante est l'année 1983 où le minimum pour plusieurs paramètres (H, Ca, Mg, Na, P, alcalinité) a été mesuré au mois d'août.

Les exportations de l'ion hydrogène au printemps (avril, mai) représentent de 57% à 86% du total annuel des exportations. La charge mensuelle la plus importante a été mesurée en mai 1983 (0,018 kg/ha). L'exportation printannière des nitrates est de 67% de la charge annuelle tandis que les exportations de sulfates et d'eau représentent 38 % des totaux annuels.

Les seules tendances temporelles dans les charges d'éléments exportés du bassin sont pour l'ion hydrogène et les nitrates (figure 36). Les exportations diminuent malgré le fait que les tests statistiques n'ont pas détecté de diminutions significatives dans leurs apports atmosphériques ni de tendances dans l'écoulement mensuel à l'exutoire.

La diminution des exportations ne se limite pas à une saison (figure 37). La diminution des exportations de nitrates est importante d'un printemps à l'autre. Les exportations de l'ion hydrogène diminuent de façon appréciable aux printemps et aux étés de 1987 et 1988.

La contribution des eaux souterraines à l'exportation du matériel du système peut seulement être estimée de

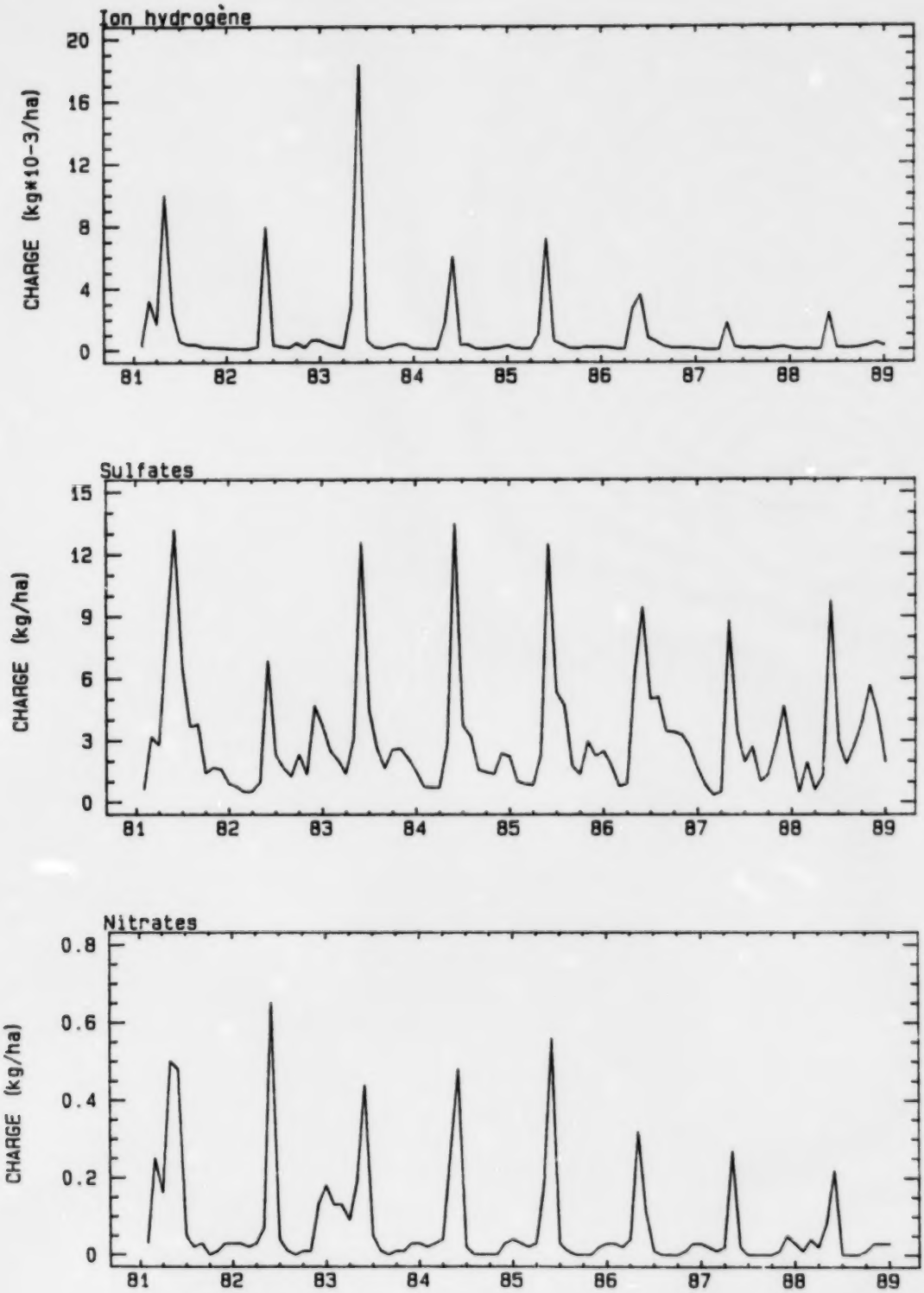


Figure 36: Évolution temporelle des exportations de l'ion hydrogène, des sulfates et des nitrates

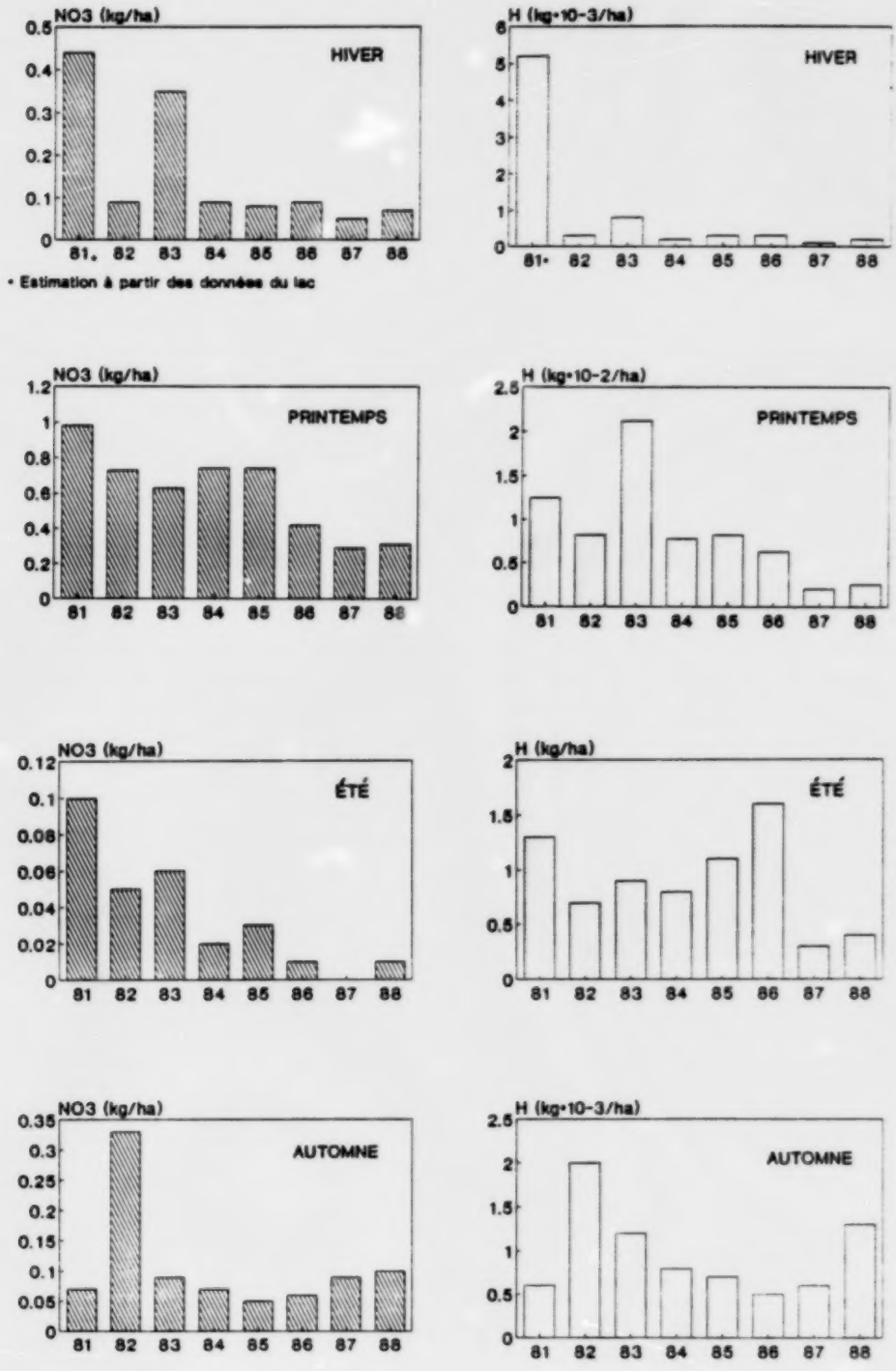


Figure 37: Charges saisonnières des nitrates et de l'ion hydrogène à l'exutoire

Tendance dans les exportations de 1981 à 1988

Paramètre	Persistance à 1 mois	Test	Tendance
H^+	Non	Kendall Sais.	Diminution
NO_3	Oui	Ken. Sais. et Hirsch & Slack	Diminution
Alc, Fe	Non	Kendall Sais.	Non
Ca Mg Na K Cl SO_4 Al P Mn Zn Ecoulement	Oui	Ken. Sais. et Hirsch & Slack	Non

façon grossière avec quelques mesures de débits et de chimie (Robitaille et al., 1983). La chimie des puits à 13 et 17 m a été utilisée dans les calculs. Les estimations sont probablement plus représentatives des charges maximums que des charges réelles car il n'y avait pas de données de qualité pour les eaux moins profondes.

Pour des paramètres tels l'ion hydrogène (0,2 g/ha), les sulfates (1,9 kg/ha) et les chlorures (0,4 kg/ha), les charges souterraines sont faibles. Pour les paramètres dont la concentration augmente avec le temps de résidence dans les dépôts meubles, tels le calcium (4 kg/ha), le magnésium (2 kg/ha), le sodium (2 kg/ha), le potassium (0,5 kg/ha) et l'alcalinité (26 kg/ha), les charges souterraines deviennent importantes par rapport aux charges du ruisseau. Les pertes souterraines de nitrates (0,2 kg/ha) représentent 6% des apports atmosphériques.

6.2.3 Bilans chimiques annuels

Sur une base annuelle, l'ion hydrogène et les nitrates sont retenus dans le bassin versant, tandis que les paramètres de minéralisation (Ca, Mg, Na) et le potassium sont perdus par le système (tableau 24). Dans le cas des paramètres de minéralisation, les exportations dépassent les apports durant tous les mois de l'année. La contribution des apports atmosphériques à l'exportation varie de 6% pour le magnésium, à 10% pour le calcium, à 16% pour le potassium et à 25% pour le sodium. Le bilan annuel net des appports atmosphériques humides moins les exportations de sulfates et de chlorures est également négatif.

Pour l'ion d'hydrogène, les apports atmosphériques sont supérieurs aux exportations pour tous les mois de l'année. Les nitrates, les chlorures et les sulfates présentent des croisements. Bien que les apports atmosphériques des nitrates soient trois fois plus forts que les exportations, il y a accumulation de cet ion dans le couvert de neige et sa libération lors de la fonte peut faire en sorte que les exportations soient supérieures aux apports durant les mois d'avril ou de mai.

Les sulfates et les chlorures sont considérés comme des éléments conservatifs donc les apports et les exportations devraient être égaux. Ainsi, la différence entre les apports humides et l'exportation serait causée par les apports atmosphériques non mesurés telle la déposition sèche.

L'incertitude dans les apports des chlorures en 1983 et 1984 complique la vérification de l'équilibre entre les apports (humides et secs) et les exportations pour cet ion.

TABLEAU 24

BILAN IONIQUE DU LAC LAFLAMME (kg/ha)

PARAMETRES	1981-82			1982-83			1983-84			1984-85			1985-86			1986-87		
	APP	EXP	BIL	APP	EXP	BIL	APP	EXP	BIL	APP	EXP	BIL	APP	EXP	BIL	APP	EXP	BIL
H^+	0,43	0,01	+0,4	0,52	0,02	+0,5	0,47	0,01	+0,46	0,67	0,01	+0,66	0,48	0,01	+0,47	0,44	0,004	+0,436
$N\text{-}NO_3^-$	2,73	1,0	+1,7	3,27	1,37	+1,9	3,32	0,98	+2,34	4,39	0,90	+3,49	3,5	0,6	+2,9	2,83	0,41	+2,42
Ca^{++}	1,0	15,6	-14,6	1,0	18,6	-17,6	2,4	16,5	-14,1	1,7	14,8	-13,1	0,8	18,4	-17,6	0,72	17,14	-16,42
Mg^{++}	0,1	3,0	-2,9	0,1	3,6	-3,5	0,3	3,6	-3,3	0,3	3,1	-2,8	0,18	3,8	-3,6	0,16	3,94	-3,78
Na^+	0,9	5,7	-4,8	0,9	6,9	-6,0	—	6,3	—	—	5,6	—	0,3	6,3	-6,0	0,29	6,8	-6,51
K^+	0,2	1,4	-1,2	0,3	3,8	-3,5	0,4	2,0	-1,6	0,4	1,6	-1,2	0,2	2,5	-2,3	0,2	1,7	-1,5
SO_4^{--}	18,2	29,1	-10,9	22,6	38,6	-16,0	23,3	35,8	-12,5	27,0	33,2	-6,2	18,4	40,0	-21,6	16,5	38,3	-21,8
Cl^-	1,5	2,3	-0,8	1,9	4,5	-2,6	—	3,4	—	—	2,8	—	1,2	3,7	-2,5	0,7	3,4	-2,7

APP :Apports atmosphériques humides
EXP :Exportation par le ruisseau
BIL :Bilan, APP-EXP

Dans le cas des sulfates, lorsque les estimations de dépositions sèches sont ajoutées aux apports humides de sulfates, les apports balancent approximativement les exportations pour la période de septembre 1981 à décembre 1982 (Papineau, 1987). L'équilibre n'a toutefois pas été vérifé après 1982 car les valeurs de dépôts secs n'étaient pas disponibles.

Le patron des flux mensuels de sulfates démontre qu'il y a des mois (juin à octobre) où les sulfates semblent être retenus dans des composantes du bassin autres que le couvert de neige. Ces sulfates probablement emmagasinés dans le sol ou la végétation en décomposition pourraient être libérés au printemps et ainsi l'équilibre annuel serait maintenu.

Le bilan chimique a également été établi pour un autre site québécois dans le cadre des études des effets des précipitations acides sur le milieu aquatique par Brouard et Lachance (1986). Le bilan chimique de la rivière Cassette sur la Côte Nord indique qu'il y a une rétention de l'ion hydrogène (-0,4 kg/ha), des nitrates (-1,8 kgN/ha), de l'ion ammonium (-1,1 kgN/ha) et des chlorures (-0,9 kg/ha). Les apports (16,8 kg/ha) et les exportations (16,3 kg/ha) de sulfates sont presque en équilibre. Tout comme au lac Laflamme, il y a perte nette des paramètres de minéralisation soit 45 kg/ha de l'ion bicarbonate, 15 kg/ha de calcium, 2 kg/ha de magnésium, 1,7 kg/ha de sodium et 1,6 kg/ha de potassium.

CONCLUSION

Le lac Laflamme est un bassin calibré représentatif de la forêt boréale et situé sur un territoire à vocation forestière. Le bassin reçoit des précipitations abondantes (1,3 m) et acides avec un pH moyen de 4,4 et une déposition moyenne de sulfates humides de 20,8 kg/ha/an. La déposition sèche est faible et est évaluée à 14% des apports totaux de sulfates. Les concentrations des composantes majeures (SO_4, NO_3, NH_4) des précipitations démontrent de la saisonnalité. La déposition atmosphérique est de nature épisodique et des valeurs aussi élevées que 5 kg/ha de sulfates humides ont été calculées pour un seul mois. De 1981 à 1985, il y a eu une tendance à la hausse des concentrations de substances acidifiantes (H, NO_3), suivie de diminutions en 1986. Les sulfates ont même diminué au point où la déposition est maintenant sous 20 kg/ha et inférieure à celle de 1981.

La qualité de l'eau est affectée par le bassin versant et on passe d'une eau faiblement ionisée et acide (pluie, neige, eau de fonte) à une eau plus ionisée et presque neutre (lac, exutoire, eau souterraine profonde). Une neutralisation importante a lieu dans le sol et les dépôts meubles et la recharge du lac se fait à 78 % par l'écoulement souterrain. L'apparition d'un écoulement hypodermique dans le bassin lorsque les niveaux d'eau sont importants au printemps a été liée à l'acidification de la couche superficielle du lac.

L'eau du lac a un pH moyen de 6,4 et une alcalinité moyenne de 108 µeq/l. L'eau a été la moins minéralisée en 1988 et la plus minéralisée en 1982. Les cinq lacs TADPA sont plus vulnérables (alcalinité < 40 µeq/l) et plus acides que le lac Laflamme.

Toutes les séries de paramètres chimiques du lac Laflamme et de l'exutoire démontrent de la saisonnalité sauf le pH (lac), les sulfates, l'aluminium et les chlorures (exutoire). La persistance des séries varie de 6 à 12 semaines. Il y a de bonnes corrélations entre les paramètres de minéralisation ainsi qu'avec des paramètres tels les nitrates et le fer. L'aluminium, les chlorures et les sulfates n'ont pas de relation forte avec les autres paramètres.

Les tests non paramétriques (Kendall Saisonnier, Hirsch et Slack, Spearman/Lettenmaier) ont détecté des tendances temporelles dans les séries de qualité de l'eau au lac et à l'exutoire sur des périodes aussi courtes que quatre ans. Le test Kendall Saisonnier a détecté plus rapidement les tendances que le test Hirsch et Slack.

De 1982 à 1985, des tendances à la hausse des sulfates et du fer et des diminutions d'alcalinité, des nitrates et de la couleur ont été détectées dans les eaux de surface au lac Laflamme. Il semble également y avoir eu acidification des eaux (augmentation des sulfates et diminution du pH) dans des lacs TADPA avoisinants.

Après 1985, au lac Laflamme, il y a eu des diminutions importantes des nitrates et de l'ion hydrogène. La diminution des concentrations de sulfates dans l'eau n'a pas été aussi importante que celle dans les précipitations. Les concentrations de sulfates dans l'eau ont également diminué dans les lacs avoisinants.

Pour l'ensemble des huit ans (1981-1988), dans le bassin calibré, des tendances décroissantes ont été détectées pour les séries de calcium et de nitrates et des tendances croissantes ont été notées pour la couleur, les sulfates et

le pH. Du côté des exportations, seulement des tendances décroissantes de l'ion hydrogène et des nitrates ont été détectées durant la période de huit ans.

L'exportation des ions majeurs à l'exutoire dépend de l'écoulement sauf pour les nitrates, l'ion hydrogène et le potassium. Pour tous les paramètres, les exportations les plus importantes ont lieu en avril ou mai.

Durant l'ensemble de la période, les apports annuels ou mensuels de l'ion hydrogène ont toujours été supérieurs aux exportations. L'ion hydrogène est donc retenu dans le bassin. Dans le cas du calcium, du sodium, du magnésium et du potassium, les apports (annuels et mensuels) sont toujours inférieurs à l'exportation. Sur une base annuelle, les nitrates sont retenus dans le bassin et les chlorures et les sulfates sont exportés mais, sur une base mensuelle, il y a des périodes d'accumulation nette dans le bassin (neige ou sol) et des périodes d'exportation nette.

Le secteur de la Réserve faunique des Laurentides est reconu comme une des zones les plus vulnérables à l'acidification. Le bassin versant du lac Laflamme est au coeur de ce secteur et la combinaison d'échantillonnage intensif à ce site, d'échantillonnnage plusieurs fois par année de cinq lacs du réseau TAPDA et d'échantillonnage spatial par le ministère de l'Environnment du Québec rend ce secteur un des plus intéressants au Québec pour l'étude des effets du transport à longue distance des polluants atmosphériques sur les milieux aquatiques.

Dans cette région, les données indiquent qu'il y a eu des dommages chimiques aux eaux de surface à des dépositions atmosphériques de sulfates humides de plus de 20 kg/ha

par an: stress printannier au lac Laflamme, tendances croissantes dans les concentrations de sulfates et tendances décroissantes dans le pH et l'alcalinité de l'eau des lacs du réseau TADPA, études paléolimnologiques des lacs Bonneville et Lagou et résultats du modèle d'acidification SIGMA/SLAM. De plus, les résultats des dernières années laissent présager que le niveau de protection de 20 kg/ha/an ne sera pas suffisant pour protéger des lacs très sensibles de la Réserve faunique des Laurentides comme les lacs Bonneville, Lagou et McCleod.

RÉFÉRENCES

Azzaria, L.M., P.J. Gélinas, R. Robitaille, J.F. Wilhelmy, 1982. Étude géologique et hydrogéologique du lac Laflamme, Parc des Laurentides, Québec. Université Laval, Département de géologie pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 95 p.

Barrie, L.A., A. Sirois, 1986. The Wet and Dry Deposition of Sulfate and Nitrate in Eastern Canada: 1979-1982. Water Air Soil Pollut 30, 303-310.

Barrie, L.A., H.A. Wiebe, K. Anlauf, 1984. Results of the Canadian Air and Precipitation Monitoring Network APN : 1982 Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Report AQ RB-84-005-T.

Barrie, L.A., H.A. Wiebe, P. Fellin, K. Anlauf, 1982. Results of the Canadian Air and Precipitation Monitoring Network APN: July 1980 to December 1981. Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Report AQRB-82-009-T.

Barry R., 1988. Simulations hydrologiques en période de fonte nivale. Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Québec.

Bédard, Y., 1984. Evolution de la qualité des eaux de fonte au lac Laflamme (Québec), printemps 1984. INRS-Eau pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 52 p.

Bernier P., F. Padilla, M. Dessureault, P.J. Gélinas, L. Azzaria, S. Goulet, 1983. Etude hydrogéologique et hydrogéochimique du bassin versant du lac Laflamme - 1982. Université Laval, Département de géologie pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 269 p.

Berryman, D., B. Bobée, D. Cluis, J. Haemmerli, 1988. Non Parametric Tests for Trend Detection in Water Quality Time-Series. Water Resources Bulletin 24 (3) 545-556.

Bobba, A.G., D.C.L. Lam, D.S. Jeffries, D. Bottomley, J.Y. Charette, P.J. Dillon, L. Logan, 1986. Modelling the Hydrological Regimes in Acidified Watersheds. Water Air Soil Pollut vol 31, 155-163.

Boutin, R., G. Robitaille, 1987. Effects of Endogenous and Exogenous Sources of Acidification on the Chemical Properties of a Podzol. In: Acid Rain: Scientific and Technical Advances. R. Perry, R.M. Harrison, J.N.B. Bell and J.N. Lester (edts). Selper Ltd, London, pp. 429-436.

Brouard, D., M. Lachance, 1986. Effets des précipitations acides sur un sous-bassin versant de la rivière des Escoumins: réponse hydrochimique et biologique. Rapp. Tech. can. sci. halieut. aquat. 1452, 89p.

Campbell, P.G.C., D. Thomassin, A. Tessier, 1986. Aluminum Speciation in Running Waters on the Canadian Pre-cambrian Shield: Kinetic Aspects. Water Air Soil Pollut 30, 1023-1032.

Canada, Environnement Canada, 1988. Données sur les eaux de surface - Québec 1987. Direction régionale des eaux intérieures, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures, Direction des ressources en eau. 55 p.

Canada, Environnement Canada, 1987. Données sur les eaux de surface - Québec 1986. Direction régionale des eaux intérieures et des terres, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures et des terres, direction des ressources en eau. 49 p.

Canada, Environnement Canada, 1986. Données sur les eaux de surface - Québec 1985. Direction régionale des eaux intérieures, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures, direction des ressources en eau. 49 p.

Canada, Environnement Canada, 1985. Données sur les eaux de surface - Québec 1984. Direction régionale des eaux intérieures, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures, direction des ressources en eau. 49 p.

Canada, Environnement Canada, 1984. Données sur les eaux de surface - Québec 1983. Direction régionale des eaux intérieures, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures, direction des ressources en eau. 49 p.

Canada, Environnement Canada, 1983. Données sur les eaux de surface - Québec 1982. Direction régionale des eaux intérieures, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures, direction des ressources en eau. 48 p.

Canada, Environnement Canada, 1982. Données sur les eaux de surface - Québec 1981. Direction régionale des eaux intérieures, région du Québec et Direction générale des eaux intérieures, direction des ressources en eau. 48 p.

Caron, F., A. Tessier, J.R. Kramer, H.P. Schwarcz, C.E. Rees, 1986. Sulfur and Oxygen Isotopes of Sulfate in Precipitation and Lake Water, Québec, Canada. Appl. Geochem., vol 1, 601-606.

Charette, J.Y., J. Haemmerli, M. Papineau, 1989. L'évolution temporelle de la qualité de l'eau et le stress acide printannier. (en préparation)

Comité fédéral provincial de coordination de la recherche et de la surveillance, 1986. Évaluation des connaissances sur le transport à grande distance des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides. Environnement Canada (éditeur) 6 vol.

Desautels, G., 1985. Analyse des pH observés à la Forêt Montmorency de décembre 1983 à décembre 1984. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, région du Québec. 19 p.

Deschenes, J., J.P. Villeneuve, 1983. Étude au moyen du modèle couplé du système hydrologique du lac Laflamme. Rapport scientifique no 162. Université du Québec, INRS-Eau, 55 p.

Dillon, P.J., R.A. Reid, R.Girard, 1986. Changes in the Chemistry of Lakes near Sudbury, Ontario Following Reduction of SO_2 Emissions. Water Air Soil Pollut, 31, 59-65.

Dixit, S.S., A.S. Dixit, R.D. Evans, 1987. Paleolimnological Study of LRTAP Network Lakes, Québec Region. Université Trent pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures et des terres, région du Québec, 199 p.

Dupont, J., 1989. État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de la Mauricie, Réseau spatial de surveillance de l'acidité des lacs du Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, ministère de l'Environnement du Québec, 84 p.

Environnement Canada, 1986. Emissions and trends of common air contaminants in Canada: 1970 to 1980. Report EPS 7/AP/17, Environmental Protection, Conservation and Protection, 104 p.

Grimard, Y., 1985. Réseau d'échantilonnage des précipitations du Québec: Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1984. ministère de l'Environnement du Québec, rapport PA-19, 99 p.

Grimard, Y., 1984. Réseau d'échantilonnage des précipitations du Québec: Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1981-1982-1983. Service de la qualité des eaux, ministère de l'Environnement du Québec, rapport PA-11, 163 p.

Haemmerli, J., 1988. Réseau TADPA-Québec, Banque de données physico-chimiques 1983-1988. Environnement Canada, Conservation et Protection, région du Québec, Direction des eaux intérieures, 25 p.

Harvey, H.H., R.C. Pierce, P.J. Dillon, J.R. Kramer, D.M. Whepdale, 1981. Acidification in the Canadian Aquatic Environment - Scientific criteria for assessing the effects of acidic deposition on aquatic ecosystems. Publication NRCC no 18476, 369 p.

Hendershot, W., F. Courchesne, C. Lapierre, L. Mendes, S. Savoie, H. Lalande, 1986. Contribution of the Surface Horizons of Podzols to the Quality of Surface Waters during Spring Snowmelt. McGill University for Environment Canada, Inland Waters Directorate, Quebec Region, 59 p.

Hern, J.A., G.K. Rutherford, G.W. VanLoon, 1985. Chemical and Pedogenetic Effects of Simulated Acid Precipitation on two Eastern Canadian Forest Soils, I. Non metals. Can J. For Res 15, 839-847.

Jacques, G., G. Boulet, 1988. Réseau d'échantilonnage des précipitations du Québec: Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1986. Ministère de l'Environnement du Québec, 77 p.

Jacques, G., Y. Grimard, 1987. Réseau d'échantilonnage des précipitations du Québec: Sommaire des données de la qualité des eaux de précipitations 1985. Ministère de l'Environnement du Québec, rapport PA-26, 73 p.

Jeffries, D.S., J.R.M. Kelso, I.K. Morrison, 1988. Physical, chemical and biological characteristics of the Turkey Lakes Watershed, central Ontario, Canada. Can, J. Fish. Aquat. Sci. 45 (Suppl 1), 3-13.

Jones, H.G., 1987. Chemical Dynamics of Snowcover and Snowmelt in a Boreal Forest. In: Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. H.G. Jones and W.J. Orville-Thomas (edts), D. Reidel Publishing company, Nato ASI series. Holland, pp. 531-574.

Jones, H.G., M. Bisson, 1980. Le lac Laflamme: qualité de l'eau et de la neige (hiver 1979-80). Rapport scientifique no 123, INRS-Eau pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 91 p.

Jones, H.G., C.R. Bougie, 1984. Techniques de prélèvement et analyses physico-chimiques de la neige recueillie en lieu ouvert à la station APN de la Forêt Montmorency, Québec. Janvier-Mars 1984. INRS-Eau pour Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, région du Québec. 41 p.

Jones, H.G., W. Sochanska, J.Y. Charette, J. Stein, 1986. Aspect qualitatif du développement au bassin du lac Laflamme d'un modèle prédictif de l'impact des précipitations acides: phase de la fonte printanière de 1985. INRS-Eau, Rapport scientifique 196, pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 142 p.

Jones, H.G., W. Sochanska, J.M. Gauthier, J.Y. Charette, R. Bougie, 1984. Le développement d'une méthodologie d'étude sur les facteurs de contrôle de la qualité des eaux de fonte et des eaux de ruissellement printanier au lac Laflamme, Québec. INRS-Eau et Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 201 p.

Martel, J.P., 1981. Régime hydrique de la matière organique dans le bassin du lac Laflamme, Forêt Montmorency. Thèse de baccalauréat, non publiée. Université Laval, Québec. 110 p.

Moyes, J.C., 1987. Évaluation des modifications à l'utilisation des terres dans les bassins versants jaugés (TGDPA) au Canada. Environnement Canada, Direction des eaux intérieures et des terres. Document no 51. 108 p.

Ouellet, M., 1980. Quelques aspects paléolimnologiques des sédiments du lac Laflamme (Parc des Laurentides, Québec) en fonction du transport atmosphérique de substances polluantes. Rapport scientifique no 132, INRS-Eau pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 76 p.

Padilla, F., P. Bernier, P.J. Gélinas, L.M. Azzaria, S. Goulet, 1983. Programme des pluies acides: observations hydrogéologiques et géochimiques des eaux souterraines du lac Laflamme durant la fonte de 1983. Université Laval, Département de géologie pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 141 p.

Papineau, M., 1988. Les études du bilan ionique du lac Laflamme en 1985 et 1986. Environnement Canada, Conservation et Protection, région du Québec, Direction des eaux intérieures. 105 p.

Papineau, M., 1987. Effects of Acid Precipitation on a Boreal Forest Ecosystem: Ion Budgets and Changes in Water Chemistry for the Laflamme Lake Watershed. Environment Canada, Conservation and Protection, Quebec region, Inland Waters and Lands Branch. 110 p.

Papineau, M., 1985. Rapport sur le bilan ionique du lac Laflamme (Forêt Montmorency) en 1984. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 50 p.

Papineau, M., 1984. Composition chimique et bilan ionique du lac Laflamme (Forêt Montmorency, Québec). Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 90 p.

Papineau, M., 1983. Le bassin du lac Laflamme: caractérisation physico-chimique du lac et établissement du bilan ionique en relation avec le transport à grande distance des polluants atmosphériques. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 95 p.

Plamondon, A.P., 1981. Étude hydrologique du bassin du lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec, en relation avec le programme d'étude d'impact des pluies acides sur l'environnement forestier. Université Laval pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 239 p.

Plamondon, A.P., 1982. La précipitation moyenne sur le bassin du lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec. Université Laval pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 28 p.

Plamondon, A.P., M. Prévost, 1982. Interception de la pluie sur le bassin du lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec - Étés 1981 et 1982. Université Laval pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 224 p.

Plamondon, A.P., R. Barry, J. Stein, 1983. Hydrodynamique du sol minéral sur le bassin du lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec. Université Laval pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 147 p.

Prévost, M., 1988. Modélisation de la fonte de la neige et de l'écoulement dans un bassin de la sapinière laurentienne. Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Québec.

Prévost, M., 1983. Fonte de la neige et interception de la pluie dans la sapinière laurentienne de la Forêt Montmorency. Thèse de maîtrise, Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Québec, 68 p.

Roberge, J., 1987. Hydrologie de la fonte nivale dans un environnement forestier boréal. Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et géodésie, Université Laval, Québec, 81 p.

Robitaille, G., 1983. Lake Laflamme Watershed, Montmorency Experimental Forest, Laurentide Reserve; a Field Guide. Canadian Forestry Service, Quebec region. 22 p.

Robitaille, G., et al., 1989. Element flux in a boreal fir forest 1981-1986. Ecological Monograph (en préparation).

Robitaille, R., P. Bernier , P.J. Gélinas, L. M. Azzaria, 1983. Étude hydrogéologique du bassin versant du lac Laflamme en 1981. Université Laval, Département de géologie pour Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec, 165 p.

Rutherford, G.K., G.W. VanLoon, S.F. Mortensen, J.A. Hern, 1985. Chemical and Pedogenetic Effects of Simulated Acid Precipitation on two Eastern Canadian Forest Soils, II Metals. Can J. For Res 15, 848-854.

Schofield, C.L., J.N. Galloway, G.R. Hendry, 1985. Surface Water Chemistry in thr ILWAS Basins. Water Air Soil Pollut 26, 403-423.

Stein, J., H.G. Jones, J. Roberge, W. Sochanska, 1986. The Prediction of Both Runoff Quality and Quantity by the Use of an Integrated Snowmelt Model. In: Modelling Snowmelt-Induced Processes; Proceedings of the Budapest Symposium, July 1986. IAHS Publ. no 155, pp. 347-358.

Thomassin, Y., H.G. Jones, 1987. Étude du rôle de l'horizon de sol organique lors de la fonte printanière au lac Laflamme. INRS-Eau, rapport scientifique 228 pour Environnement Canada, Direction des eaux et des terres, Région du Québec. 33 p.

Verreault, G., C. Langlois, 1984. Étude de la population d'omble de fontaine Salvelinus fontinalis (Mitchill) du lac Laflamme, Réserve faunique des Laurentides (Québec). Rapport techn. can. sci. halieut. aquat. no 1316F, 61 p.

Vet, R.J., W.B. Sukloff, M.E. Still, J.B. Martin, W.F. Kobelka, A.J. Gaudenzi, 1988a. Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitation Chemistry Data Summary 1986. Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Air Quality Monitoring and Assesment Division. 468 p.

Vet, R.J., W.B. Sukloff, M.E. Still, J.B. Martin, W.F. Kobelka, A.J. Gaudenzi, 1988b. Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitation Chemistry Data Summary 1985. Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Air Quality Monitoring and Assesment Division. 482 p.

Vet, R.J. W.B. Sukloff, M.E. Still, R. Gilbert, 1986. Canadian Air and Precipitation Monitoring Network CAPMoN, Precipitation Chemistry Data Summary 1983-1984. Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Air Quality Monitoring and Assessment Division. 544 p.

Wiebe, H.A., R.J. Vet, L.A. Barrie, L. Anlauf, 1985. Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (APN), Final Data Report, December 1982- 1983. Environment Canada, Atmospheric Environment Service. Air Quality Monitoring and Assessment Division. 105 p.

Wright, R.F., E. Gjessing, N. Christophersen, E. Lotse, H.M. Seip, A. Semb, B. Sletaune, R. Storhaug, K. Wedum, 1986. Project Rain: Changing Acid Deposition to Whole Catchments. The First Year of Treatment. Water Air Soil Pollut, 30, 47-63.

ANNEXE 1

LES ÉTUDES AU LAC LAFLAMME ET LES CHERCHEURS RESPONSABLES

PROJETS	NOM ET AFFILIATION	PÉRIODE
Précipitations	Stills (SEA)	1980-1989
Microclimat,hydrologie	Plamondon (U.Laval)	1980-1984
Géologie,hydrogéologie	Azzaria, Gélinas (U.Laval)	1980-1983
Étude sismique	Robitaille,Wilhelmy (U.L)	1981
Paléolimnologie	Ouellet (INRS-Eau)	1980
	Evans (Trent)	1985-1986
Macrophytes	DEI	1981-1985
Phytoplancton	Auclair (INRS-Eau)	1980-1981
Poisson	Verreault (P&O)	1982-1986
Périphyton,benthos	Moreau (UL), Planas (UQUAM)	1981-1988
Sous-bois, sol	Robitaille (FC)	1979-1989
Chimie du sol	Hendershot (McGill)	1986-1988
	Rutherford (Queen's)	1982-1983
Mychorrhize	Fortin (U.Laval)	1980-1986
Etude isotopique	Kramer (McM.), Tessier(INRS)	1983-1986
Neige et glace	Jones (INRS-eau)	1980,83-88
Modélisation (fonte)	Charette (DEI), Stein (UL) Jones, Hendershot	1983-1989
Bilan ionique	Papineau (DEI)	1981-1989
Cycle du soufre	Carignan (INRS-Eau)	1986-1988
Spéciation de Al	Campbell (INRS-Eau)	1985-1986

SEA : Service de l'environnement atmosphérique
DEI : Direction des eaux intérieures
P&O : Pêches et Océans Canada
FC : Forêt Canada
McM : Université McMaster
UL : Université Laval

Annexe 2

PRÉCIPITATION ET DÉCHARGE MENSUELLES AU LAC LAFLAMME.

Mois	Précipitation Capmon (mm)	Précipitation Bassin (mm)	Neige Bassin (mm)	Débit total (mm)	Débit total (m^3/s)	Débit moyen (m3/s)	Débit maximun (m^3/s)	Débit minimum (m^3/s)	Evaporation Bac (mm)
1981									
Janvier	26,4	25,6	25,6	15,4	0,122	0,004	0,005	0,003	0,0
Février	235,8	228,7	126,1	74,0	0,586	0,021	0,067	0,004	0,0
Mars	89,1	86,4	52,4	38,0	0,301	0,010	0,033	0,006	0,0
Avril	124,7	121,0	22,3	146,3	1,158	0,039	0,092	0,016	0,0
Mai	124,2	120,5	3,9	220,6	1,747	0,056	0,093	0,030	0,0
Juin	192,4	186,6	0,0	107,1	0,848	0,028	0,067	0,013	112,1
Juillet	78,6	76,2	0,0	74,3	0,588	0,019	0,071	0,007	138,5
Août	190,7	185,0	0,0	97,9	0,775	0,025	0,056	0,006	89,5
Septembre	93,6	90,8	7,8	39,2	0,310	0,010	0,026	0,004	56,9
Octobre	112,0	108,6	19,4	52,3	0,414	0,013	0,032	0,007	0,0
Novembre	47,0	45,6	33,0	43,1	0,341	0,011	0,018	0,006	0,0
Décembre	54,8	53,2	51,4	24,2	0,192	0,006	0,008	0,005	0,0
Annuel	1369	1328	342	932	7,382				397.0
1982									
Janvier	111,7	108,3	108,3	21,2	0,168	0,005	0,013	0,002	0,0
Février	31,5	30,6	30,6	13,6	0,108	0,004	0,007	0,002	0,0
Mars	110,9	107,6	82,5	15,4	0,122	0,004	0,008	0,002	0,0
Avril	95,4	92,5	64,0	26,4	0,209	0,007	0,014	0,003	0,0
Mai	38,8	37,6	0,0	191,2	1,514	0,049	0,156	0,012	0,0
Juin	113,3	109,9	0,0	59,5	0,471	0,016	0,043	0,006	110,0
Juillet	96,8	93,9	0,0	40,0	0,317	0,010	0,022	0,002	126,9
Août	119,2	115,6	0,0	35,6	0,282	0,009	0,015	0,003	84,0
Septembre	114,4	111,0	0,0	65,7	0,520	0,017	0,032	0,010	48,6
Octobre	57,5	55,8	4,8	38,6	0,306	0,010	0,016	0,007	0,0
Novembre	194,3	188,5	52,9	107,9	0,854	0,028	0,086	0,007	0,0
Décembre	152,8	148,2	54,3	76,8	0,608	0,020	0,039	0,009	0,0
Annuel	1237	1200	397	692	5,479				369.5

Annexe 2 (suite)

PRÉCIPITATION ET DÉCHARGE MENSUELLES AU LAC LAFLAMME.

Mois	Précipitation Capmon (mm)	Précipitation Bassin (mm)	Neige Bassin (mm)	Débit total (mm)	Débit total (m^3/s)	Débit moyen (m^3/s)	Débit maximun (m^3/s)	Débit minimun (m^3/s)	Evaporation Bac (mm)
1983									
Janvier	101,0	98,0	61,1	50,5	0,400	0,013	0,042	0,007	0,0
Février	125,6	121,8	62,1	44,1	0,349	0,012	0,053	0,007	0,0
Mars	96,7	93,8	51,4	31,4	0,249	0,008	0,033	0,005	0,0
Avril	194,7	188,9	84,4	78,6	0,622	0,021	0,081	0,005	0,0
Mai	242,7	235,4	3,1	356,3	2,821	0,091	0,212	0,035	0,0
Juin	75,1	72,8	0,2	116,3	0,921	0,031	0,084	0,011	151,7
Juillet	139,4	135,2	0,0	60,6	0,480	0,015	0,046	0,006	138,2
Août	68,1	66,1	0,0	40,9	0,324	0,010	0,041	0,004	113,5
Septembre	174,6	169,4	0,0	63.9	0,506	0,017	0,038	0,006	75,5
Octobre	109,8	106,5	6,7	66,3	0,525	0,017	0,030	0,010	0,0
Novembre	164,9	160,0	108,7	53,7	0,425	0,014	0,023	0,002	0,0
Décembre	179,6	174,2	168,1	36,4	0,288	0,009	0,014	0,006	0,0
Annuel	1672	1622	546	999	7,91				478.9
1984									
Janvier	47,6	46,2	45,2	19,5	0,154	0,005	0,006	0,004	0,0
Février	95,4	92,5	73,2	17,8	0,141	0,005	0,010	0,002	0,0
Mars	60,0	58,2	38,6	18,7	0,148	0,005	0,012	0,002	0,0
Avril	75,1	72,8	21,2	67,8	0,537	0,018	0,091	0,002	0,0
Mai	148,7	144,2	22,6	295,2	2,337	0,075	0,192	0,031	0,0
Juin	91,4	88,7	0,0	83,1	0,658	0,022	0,038	0,010	118,0
Juillet	148,0	143,6	0,0	74,9	0,593	0,019	0,073	0,007	114,0
Août	99,0	96,0	0,0	35,4	0,280	0,009	0,022	0,004	108,0
Septembre	104,2	101,1	0,8	35,0	0,277	0,009	0,025	0,004	59,0
Octobre	51,4	49,9	8,4	34,1	0,270	0,009	0,012	0,006	0,0
Novembre	126,2	122,4	33,7	55,8	0,442	0,015	0,037	0,008	0,0
Décembre	117,5	114,0	96,4	42,6	0,337	0,011	0,015	0,008	0,0
Annuel	1165	1130	340	780	6,174				399.0

Annexe 2 (suite)

PRÉCIPITATIONS ET ÉCOULEMENTS MENSUELS AU LAC LAFLAMME

Mois	Précipitation Capmon (mm)	Précipitation Bassin (mm)	Neige Bassin (mm)	Débit total (mm)	Débit total (m^3/s)	Débit moyen (m^3/s)	Débit maximum (m^3/s)	Débit minimum (m^3/s)	Evaporation Bac (mm)
1985									
Janvier	56,6	54,9	54,9	19,8	0,157	0,005	0,013	0,000	0,0
Février	104,5	101,4	101,4	16,9	0,134	0,005	0,008	0,003	0,0
Mars	93,2	90,4	86,5	16,0	0,127	0,004	0,008	0,002	0,0
Avril	111,4	108,1	34,9	49,0	0,388	0,013	0,053	0,003	0,0
Mai	146,5	142,1	8,2	277,9	2,200	0,071	0,182	0,025	40,4
Juin	123,5	119,8	0,0	116,2	0,920	0,031	0,068	0,015	84,8
Juillet	197,0	191,1	0,0	99,1	0,785	0,025	0,061	0,012	124,1
Août	49,2	47,7	0,0	35,5	0,281	0,009	0,017	0,005	98,6
Septembre	119,1	115,5	0,0	29,8	0,236	0,008	0,034	0,003	65,5
Octobre	120,5	116,9	7,1	67,1	0,531	0,017	0,045	0,009	8,0
Novembre	89,6	86,9	40,6	48,9	0,387	0,013	0,025	0,008	0,0
Décembre	112,4	109,0	69,5	45,8	0,363	0,012	0,029	0,006	0,0
Annuel	1324	1284	403	822	6,509				421,4
1986									
Janvier	176,3	171,0	147,5	36,5	0,289	0,009	0,037	0,003	0,0
Février	20,7	20,1	20,1	16,0	0,127	0,005	0,008	0,003	0,0
Mars	106,8	103,6	98,4	20,7	0,164	0,005	0,009	0,003	0,0
Avril	105,9	102,7	87,4	186,0	1,473	0,049	0,334	0,009	0,0
Mai	160,1	155,3	14,5	251,2	1,989	0,064	0,351	0,018	0,0
Juin	179,8	174,4	0,6	118,3	0,937	0,031	0,085	0,014	127,7
Juillet	174,7	169,5	0,0	116,8	0,925	0,030	0,130	0,011	106,2
Août	155,6	150,9	0,0	78,4	0,621	0,020	0,033	0,013	88,7
Septembre	149,2	144,7	0,0	76,8	0,608	0,020	0,057	0,010	50,9
Octobre	93,8	91,0	11,4	77,4	0,613	0,020	0,027	0,012	0,0
Novembre	132,8	128,8	96,2	57,6	0,456	0,015	0,029	0,010	0,0
Décembre	143,7	139,4	134,3	36,0	0,285	0,009	0,020	0,006	0,0
Annuel	1599	1551	610	1072	8,487				373,5

Annexe 2 (suite)

PRÉCIPITATIONS ET ÉCOULEMENTS MENSUELS AU LAC LAFLAMME

Mois	Précipitation Capmon (mm)	Précipitation Bassin (mm)	Neige Bassin (mm)	Débit total (mm)	Débit total (m^3/s)	Débit moyen (m^3/s)	Débit maximum (m^3/s)	Débit minimum (m^3/s)	Evaporation Bac (mm)
1987									
Janvier	51,2	49,7	49,7	20,3	0,161	0,005	0,008	0,002	0,0
Février	8,4	8,1	8,1	8,7	0,069	0,002	0,004	0,001	0,0
Mars	115,4	111,9	31,0	11,4	0,090	0,003	0,008	0,002	0,0
Avril	64,1	62,2	36,7	200,3	1,586	0,053	0,124	0,021	0,0
Mai	74,6	72,4	0,7	91,7	0,726	0,023	0,054	0,014	0,0
Juin	150,3	145,8	0,0	47,4	0,375	0,013	0,048	0,002	139,0
Juillet	125,0	121,2	0,0	66,3	0,525	0,017	0,049	0,010	115,0
Août	96,0	93,1	0,1	25,9	0,205	0,007	0,010	0,004	99,0
Septembre	118,8	115,2	8,8	32,6	0,258	0,009	0,017	0,005	45,0
Octobre	133,2	129,2	23,1	77,7	0,615	0,020	0,036	0,010	0,0
Novembre	144,1	139,8	32,8	85,9	0,680	0,023	0,047	0,012	0,0
Décembre	70,6	68,5	67,4	42,1	0,333	0,011	0,023	0,005	0,0
Annuel	1152	1117	258	710	5,623				398
1988									
Janvier	101,3	98,3	82,5	8,6	0,068	0,002	0,011	0,000	0,0
Février	147,4	143,0	143,0	42,3	0,335	0,012	0,053	0,002	0,0
Mars	55,5	53,8	40,1	13,4	0,106	0,003	0,006	0,002	0,0
Avril	98,0	95,1	77,6	28,7	0,227	0,008	0,011	0,004	0,0
Mai	47,8	46,4	0,2	229,4	1,816	0,059	0,112	0,008	0,0
Juin	114,2	110,8	0,3	56,7	0,449	0,015	0,037	0,008	122,0
Juillet	104,0	100,9	0,0	44,2	0,350	0,011	0,019	0,005	0,0
Août	183,7	178,2	0,0	64,9	0,514	0,017	0,071	0,006	0,0
Septembre	137,8	133,7	0,5	88,2	0,698	0,023	0,041	0,015	0,0
Octobre	193,8	188,0	58,4	121,1	0,959	0,031	0,095	0,016	0,0
Novembre	145,4	141,0	98,6	91,4	0,724	0,024	0,055	0,015	0,0
Décembre	80,5	78,1	76,9	39,8	0,315	0,010	0,016	0,007	0,0
Annuel	1409	1367	578	829	6,561				

ANNEXE 3

Comparaison des lacs du réseau TADPA et du lac Laflamme

	Laflamme[1]	MaCleod	Bonneville	Josselin	Veilleux	Lagou
Acidité						
pH[2]	6,5	5,5	5,2	5,8	6,0	5,7
Al (mg/l)	0,080	0,139	0,163	0,060	0,053	0,078
COD(mg/l)	3,6	3,9	3,6	2,6	2,8	2,0
couleur	23	17	17	8	7	4
AFFECTÉ						
SO4(mg/l)	4,2	4,0	4,2	3,7	3,4	4,4
Cl (mg/l)	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
NO3(mgN/l)	0,04	0,009	0,038	0,030	0,038	0,044
NH4(mgN/l)	0,029	0,012	0,040	0,015	0,023	0,020
POUVOIR TAMPON						
Alc.(mg/l)	5,3	0,5	0,0	0,7	1,4	0,4
Cond(µS/cm)	23	13,9	15,2	13,6	13,6	15,3
Ca (mg/l)	2,3	1,03	1,0	1,18	1,23	1,29
Mg (mg/l)	0,5	0,30	0,28	0,20	0,20	0,24
Na (mg/l)	0,9	0,39	0,40	0,40	0,40	0,47
K (mg/l)	0,2	0,20	0,19	0,20	0,24	0,18
SiO2(mg/l)	5,12	2,24	2,66	1,46	1,78	3,46
Fe (mg/l)	0,124	0,117	0,076	0,035	0,09	0,017
PHYSIOGRAPHIE						
Altitude(m)	777	975	808	671	716	594
Aire:tot(km^2)	0,68	1,03	1,04	1,32	0,36	1,57
Aire:lac(km^2)	0,06	0,12	0,10	0,31	0,08	0,16
Profondeur(m)	5,0	8,5	6,5	12	14	21,5
ÉCHANTILLONNAGE						
N	251	10	30	8	10	30

1. pour la période du réseau (mai 1983 à mars 1988)
2. Les valeurs des paramètres sont des médianes

ANNEXE 4

STATISTIQUES DESCRIPTIVES

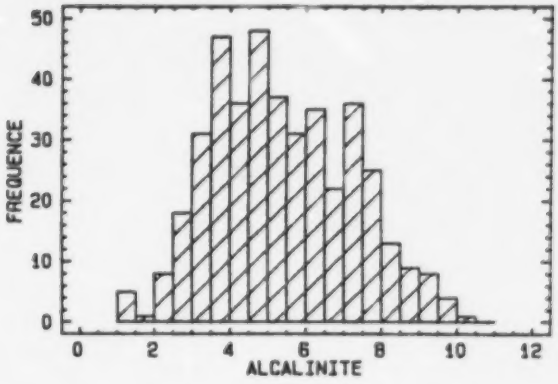
ALCALINITE (mgCaCO3/l)

An	Moy	E.t	Min	Max
81	4.42	1.97	1.08	7.88
82	6.73	1.81	3.60	9.88
83	5.39	1.31	2.70	8.80
84	5.50	1.69	2.17	8.09
85	5.51	2.17	2.79	10.05
86	5.07	1.84	2.04	8.01
87	5.45	1.49	2.68	8.65
88	5.07	1.60	3.12	8.66
8a	5.41	1.87	1.08	10.05

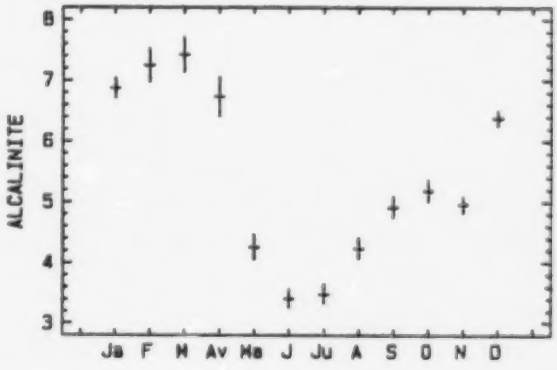
PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 9 SEMAINES
TYPE : NON MARK
NORMALITE : OUI (K.S.)
CORRELATION: (+) Ca Mg Na Cond P NO3 Fe (-) Coul Al

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

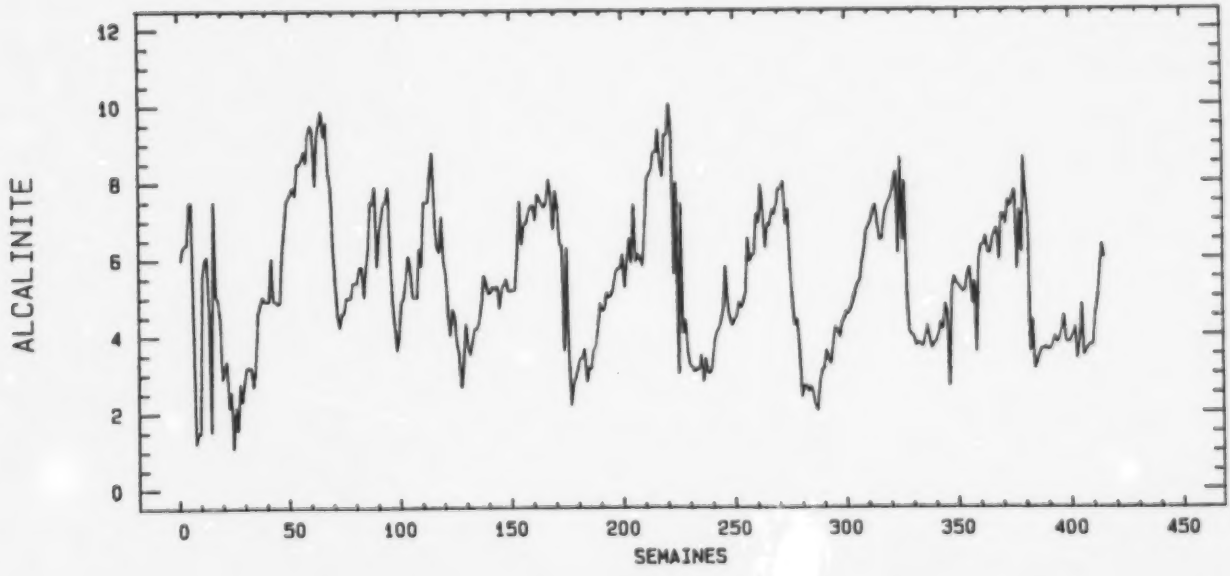
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

MAGNESIUM (mg/l)

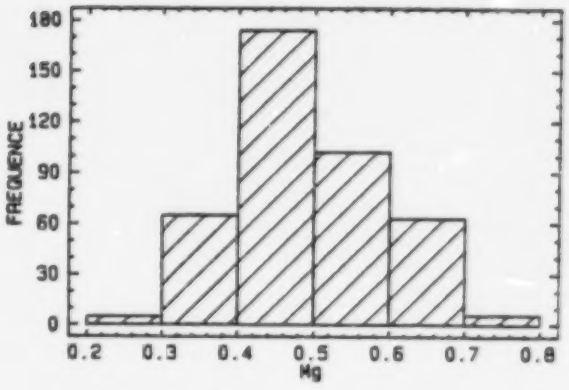
An	Moy	E.t	Min	Max
81	0.50	0.09	0.26	0.67
82	0.54	0.10	0.4	0.8
83	0.54	0.09	0.4	0.72
84	0.53	0.11	0.3	0.7
85	0.54	0.13	0.3	0.8
86	0.53	0.09	0.3	0.7
87	0.55	0.07	0.4	0.7
88	0.52	0.09	0.4	0.7
8ans	0.53	0.10	0.26	0.8

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 7 SEMAINES
TYPE : NON MARK (2)

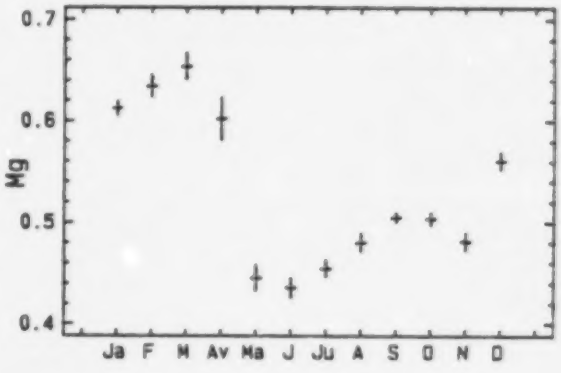
NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) Alc Ca Na
Cond NO3 P Fe

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

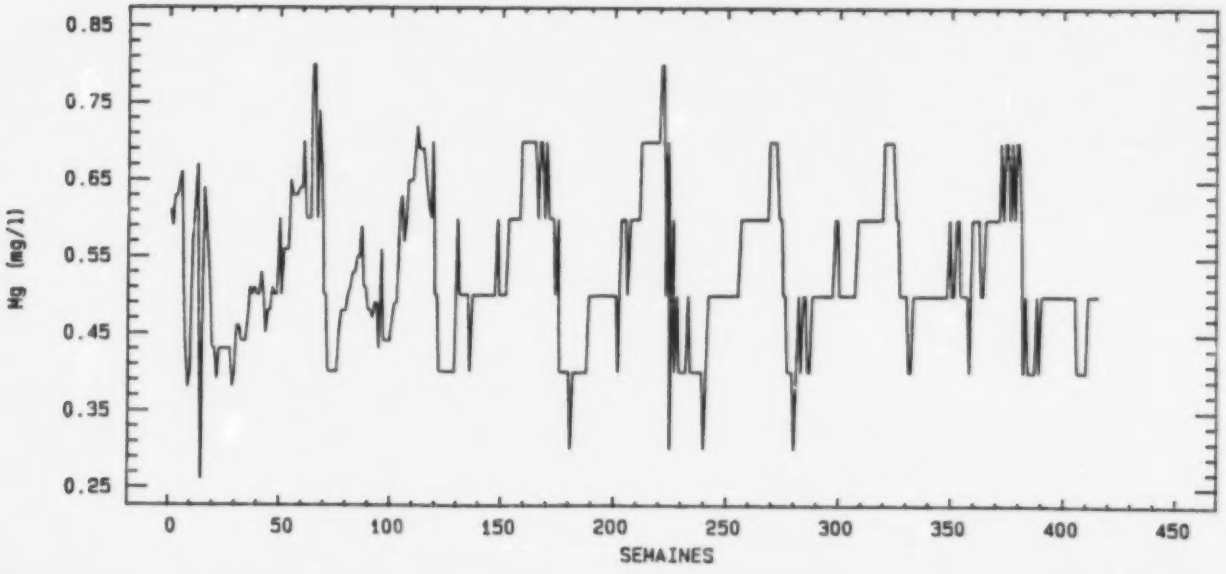
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

SODIUM (mg/l)

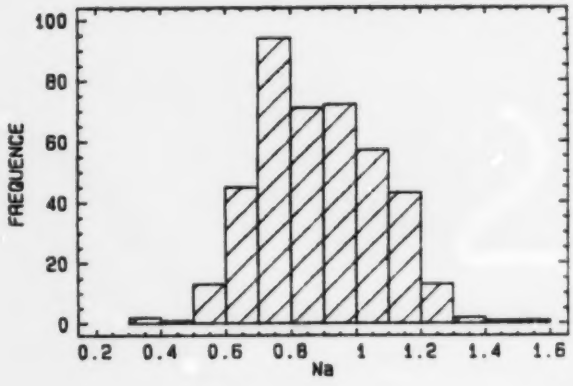
An	Moy	E.t	Min	Max
81	0.92	0.20	0.4	1.3
82	0.99	0.18	0.6	1.3
83	0.90	0.19	0.4	1.4
84	0.95	0.19	0.5	1.5
85	0.94	0.24	0.6	1.6
86	0.90	0.15	0.6	1.3
87	0.99	0.13	0.7	1.3
88	0.90	0.17	0.7	1.3
8ans	0.94	0.19	0.4	1.6

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 8 SEMAINES
TYPE : NON MARK (2)

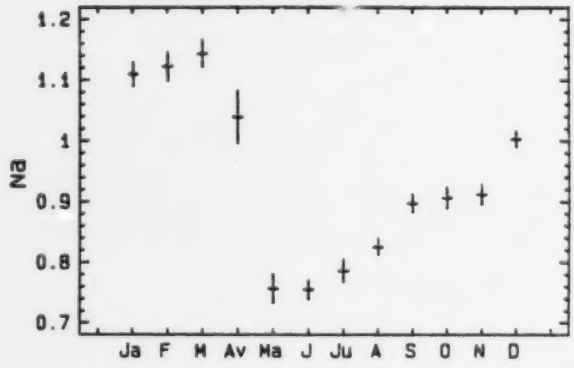
NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) Mg Alc Ca
Cond P NO3

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

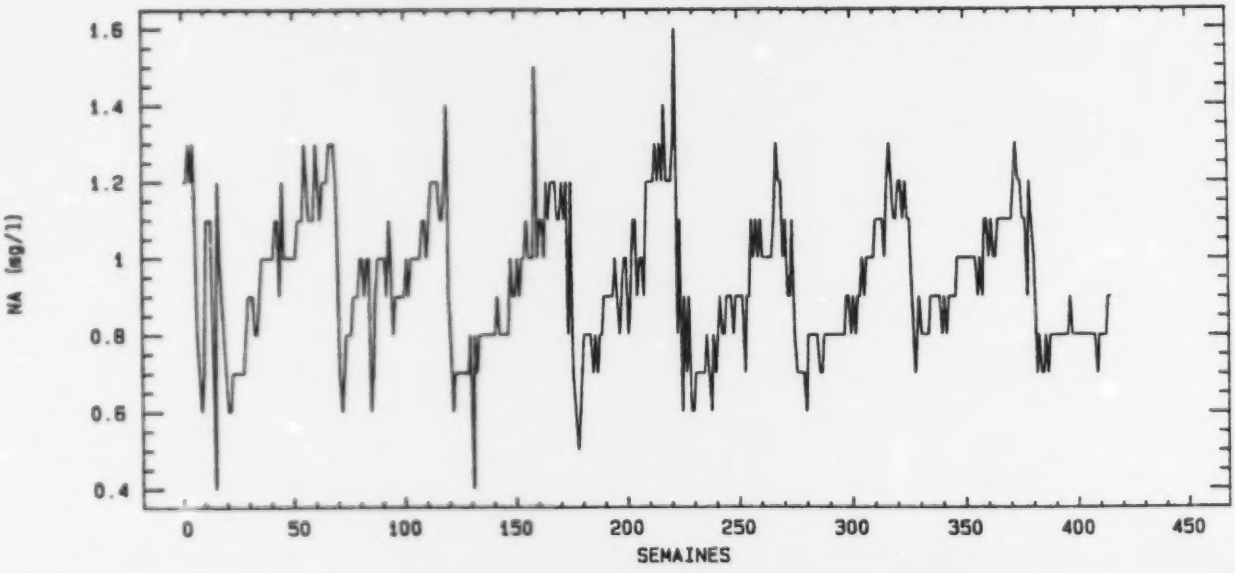
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

CONDUCTIVITÉ (µS/cm)

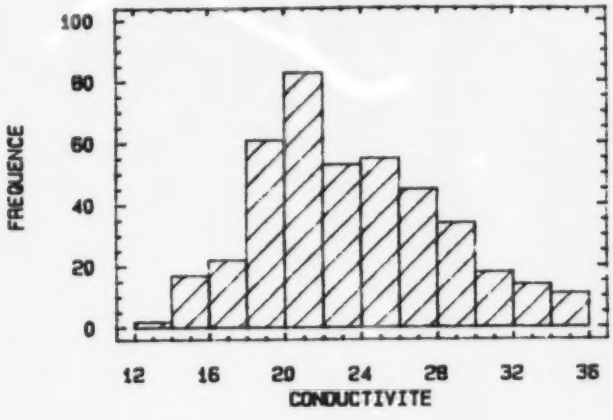
An	Moy	E.t	Min	Max
81	19.7	3.9	14	29
82	27.6	4.3	21	36
83	24.4	5.3	14	36
84	22.2	3.9	15	31
85	26.1	5.3	16	36
86	23.8	4.4	18	32
87	25.2	3.4	21	33
88	23.5	3.5	19	30
8ans	24.1	4.8	14	36

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 9 SEMAINES
TYPE : NON MARK (2)

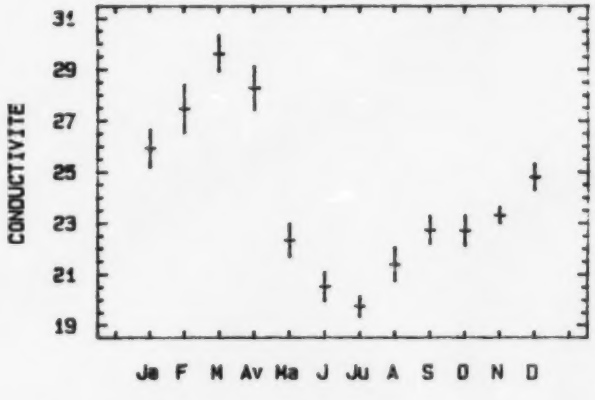
NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) Alc Ca Mg
(+)Na NO3 Fe P

TENDANCE
REGRESSION : NON
KENDALL SAI: NON
HIRSH&SLACK: NON

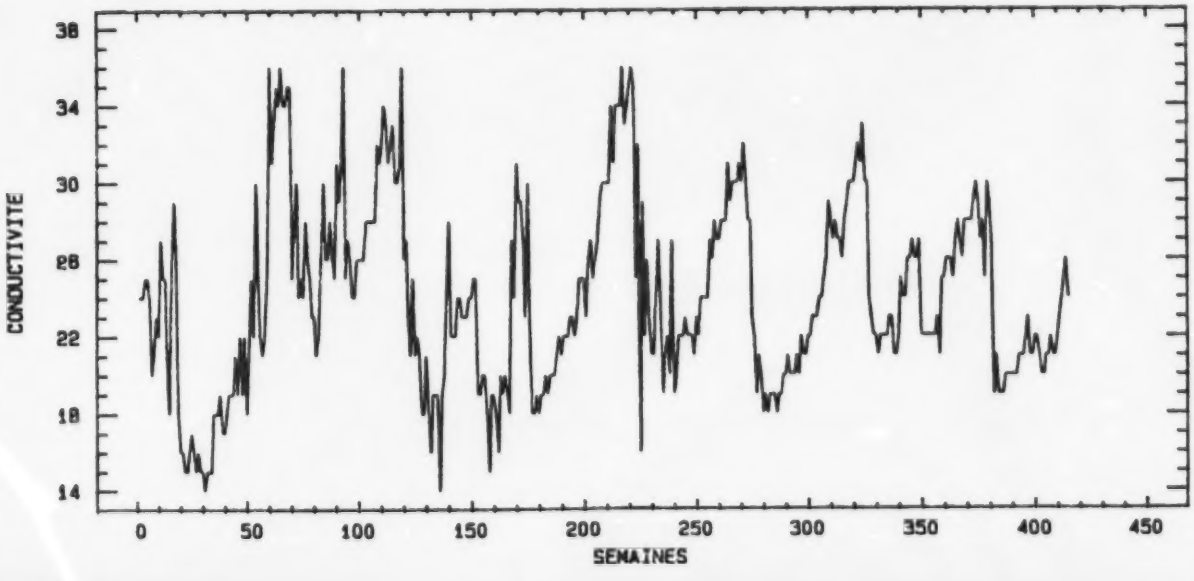
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

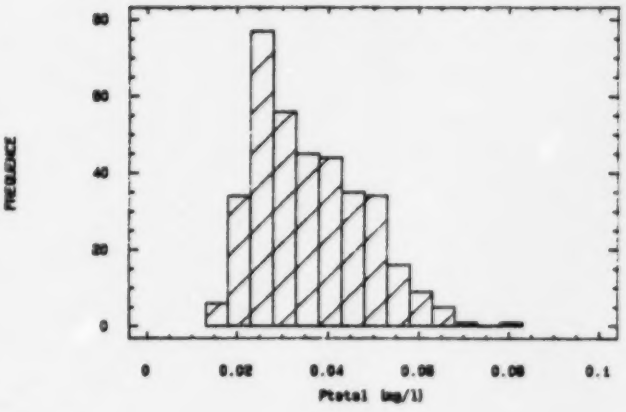
Ptotal (mg/l)

An	Moy	E.t	Min	Max
81	0.040	0.012	0.018	0.083
82	0.037	0.011	0.021	0.060
83	0.028	0.007	0.015	0.051
84	0.031	0.010	0.014	0.065
85	0.040	0.010	0.023	0.063
86	0.042	0.013	0.020	0.072
87	0.036	0.012	0.018	0.060
7 ans	0.036	0.012	0.014	0.083

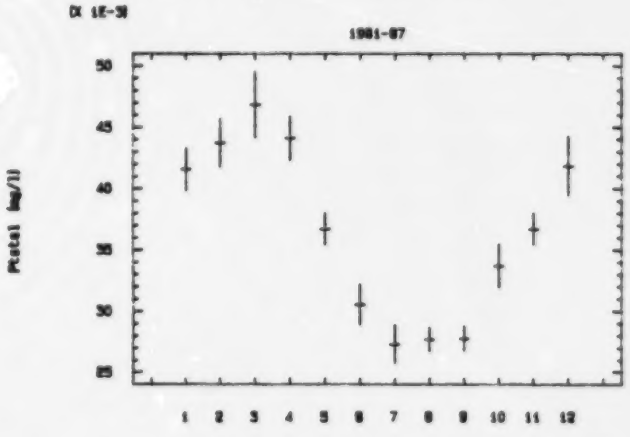
PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 11 SEMAINES
TYPE : NON MARK (3)
NORMALITE : NON
CORRELATION: Ca,Mg,Na,Zn Alc,NO3,Cond

TENDANCE
REGRESSION : NON
KENDALL SAI: —
HIRCH/SLACK: NON

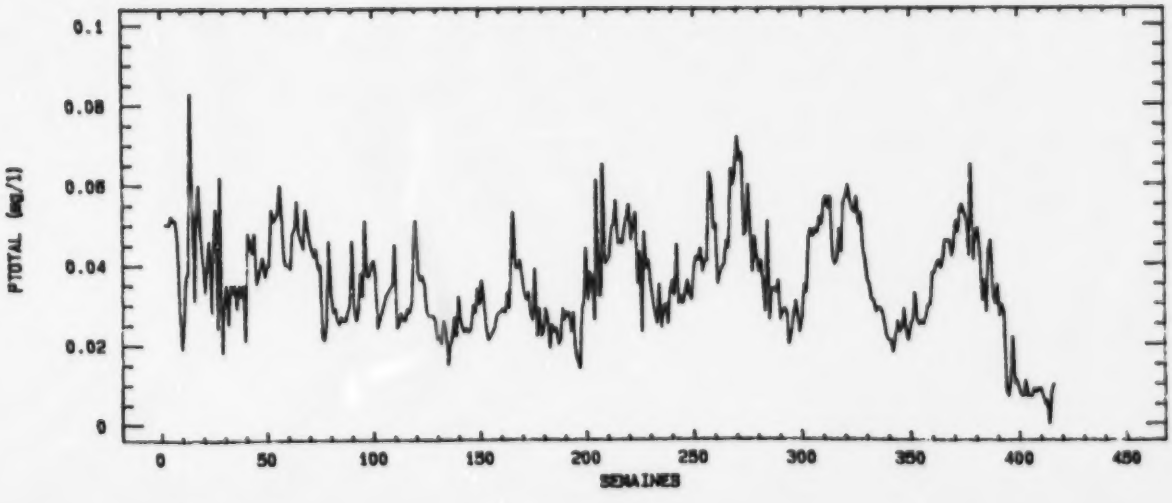
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

NITRATES (mgN/l)

An	Moy	E.t	Min	Max
81	0.12	0.14	<.01	0.52
82	0.14	0.11	<.01	0.41
83	0.12	0.12	<.01	0.34
84	0.11	0.12	<.01	0.37
85	0.10	0.12	<.01	0.41
86	0.06	0.07	<.01	0.22
87	0.06	0.07	<.01	0.25
88	0.07	0.08	<.01	0.35
8ans	0.10	0.11	<.01	0.52

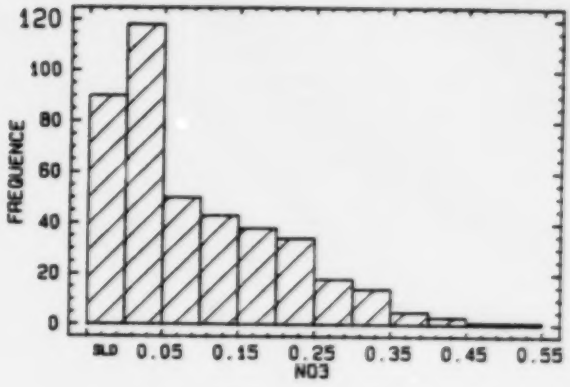
PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 9 SEMAINES
TYPE : NON MARK

NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) Alc Ca Mg Na Mn Cond Fe P (-) pH

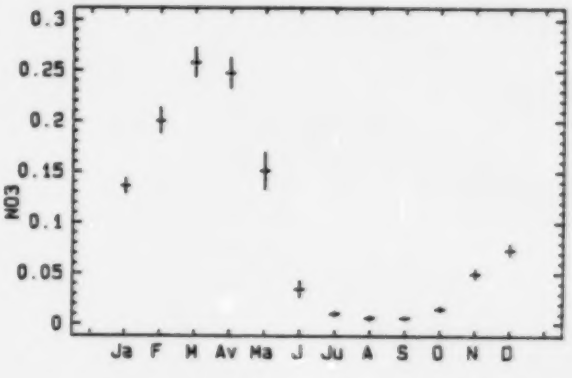
TENDANCE

REGRESSION : DIMINUTION
HIRSCH&SLACK: DIMINUTION
KENDALL SAI : DIMINUTION

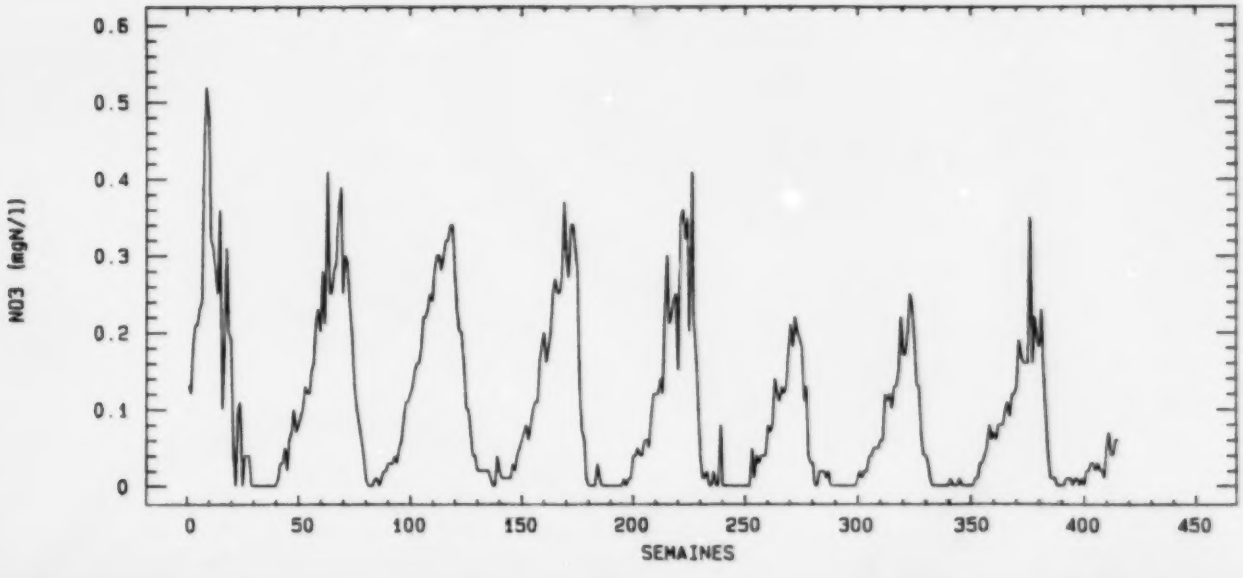
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

pH

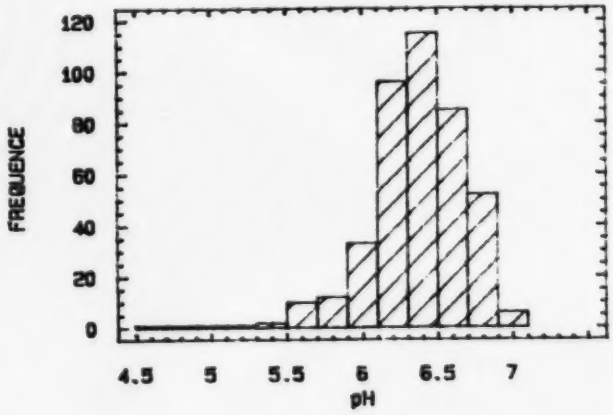
An	Moy	E.t	Min	Max
81	6.12	0.48	4.6	6.7
82	6.25	0.22	5.6	6.7
83	6.33	0.24	5.8	6.8
84	6.39	0.24	5.9	7.0
85	6.38	0.21	5.8	6.7
86	6.50	0.20	6.1	6.9
87	6.72	0.19	6.2	7.0
88	6.60	0.23	6.0	7.0
8ans	6.41	0.32	4.6	7.0

PERIODICITE: NON
PERSISTANCE: 12 SEMAINES
TYPE : NON MARK (3)

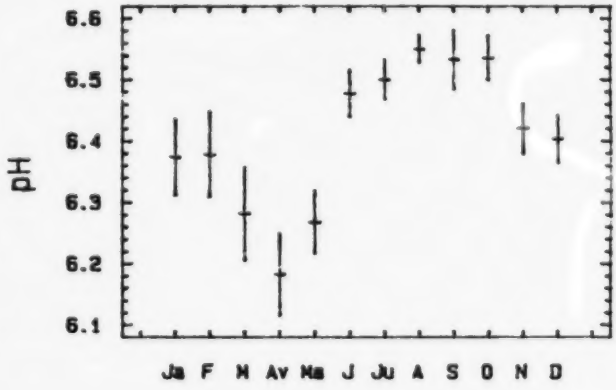
NORMALITE : NON
CORRELATION: (-) NO3 Mn

TENDANCE
REGRESSION : AUGMENTATION
SPEAR/LETT : AUGMENTATION
KENDALL/SPE: AUGMENTATION

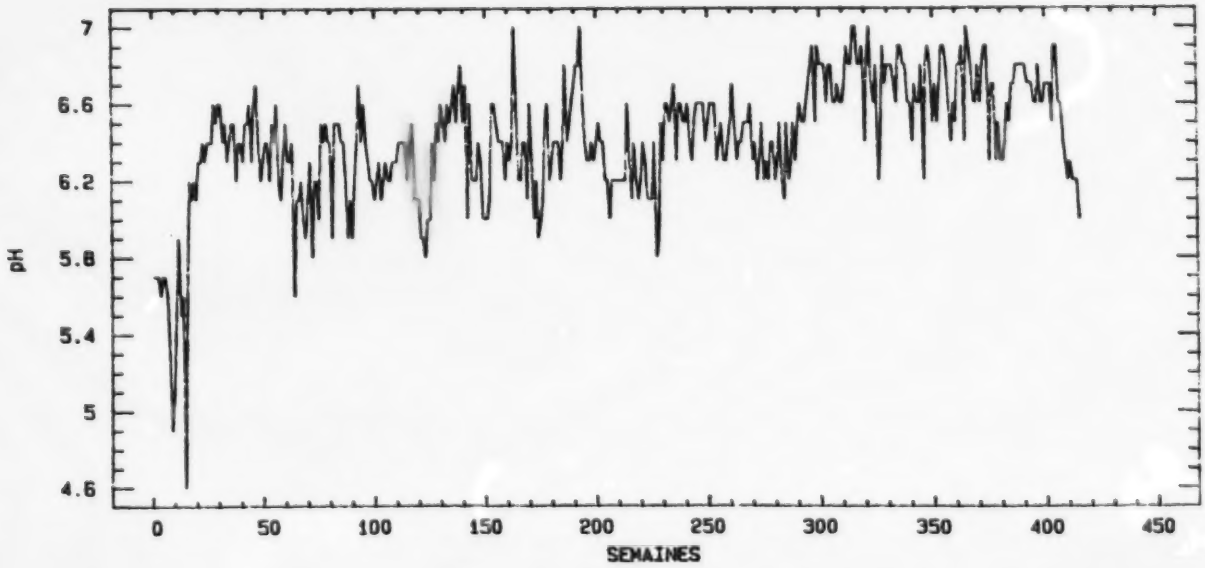
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

FER (µg/l)

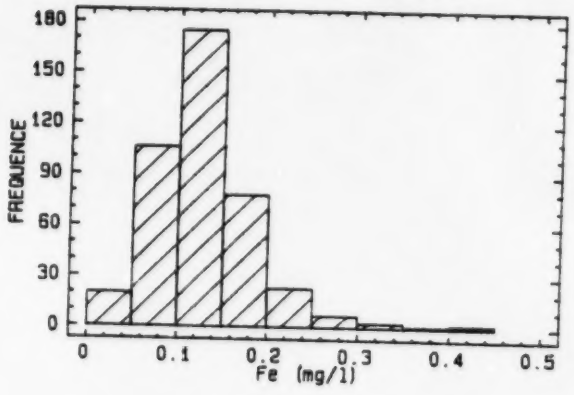
An	Moy	E.t	Min	Max
81	112	62	14	257
82	111	53	14	212
83	134	59	57	420
84	135	44	60	330
85	145	71	55	440
86	142	44	62	301
87	129	52	51	298
88	131	66	44	372
8ans	130	48	14	440

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 6 SEMAINES
TYPE : NON MARK (3)

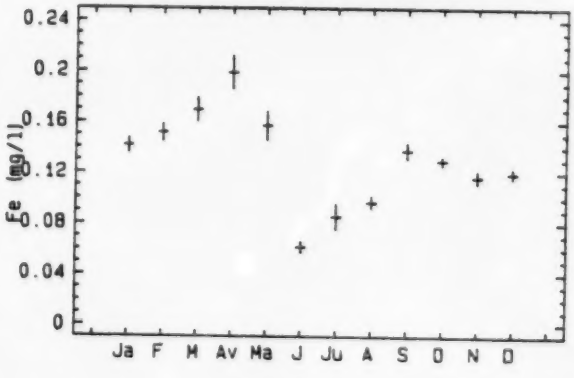
NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) Mn Cond Mg Na Ca Alc NO3

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

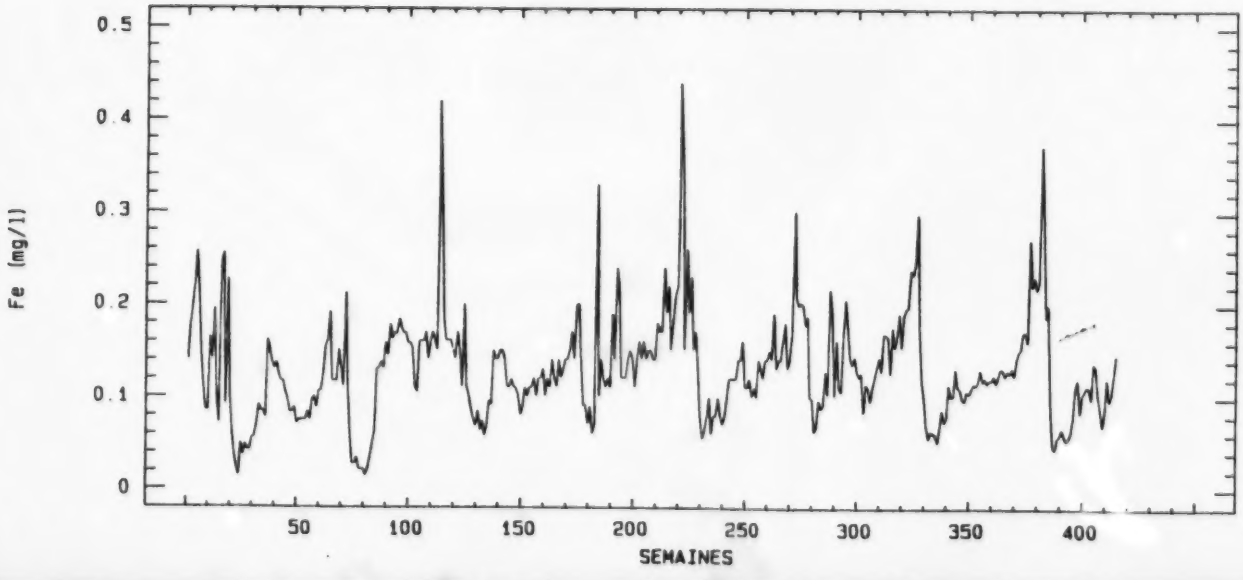
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

POTASSIUM (mg/l)

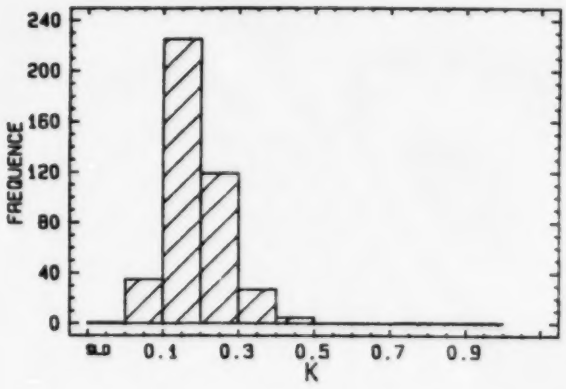
An	Moy	E.t	Min	Max
81	0.16	0.05	0.05	0.3
82	0.22	0.08	0.09	0.38
83	0.27	0.16	<.1	1.0
84	0.22	0.12	0.1	0.9
85	0.23	0.06	0.1	0.4
86	0.24	0.08	0.15	0.45
87	0.18	0.07	0.04	0.35
88	0.19	0.06	0.1	0.35
8ans	0.21	0.10	0.04	1.0

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 9 SEMAINES
TYPE : NON MARK (4)

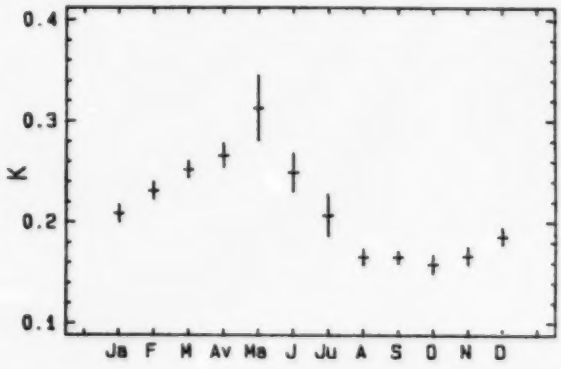
NORMALITE : NON
CORRELATION: NON

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

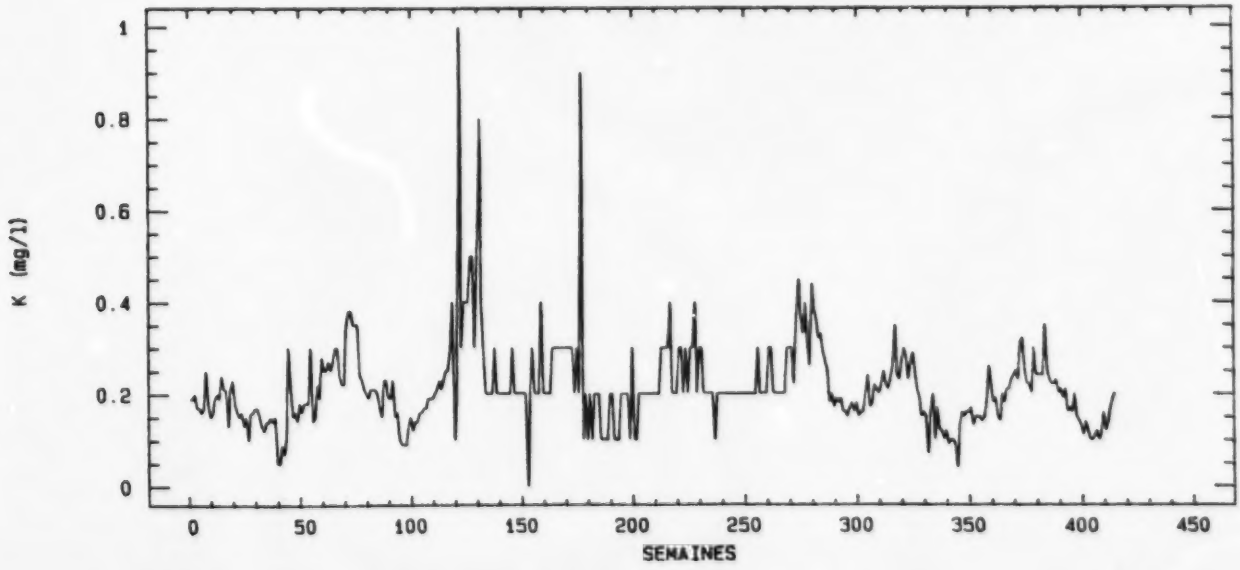
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

MANGANESE (µg/l)

An	Moy	E.t	Min	Max
81	27	15	8	65
82	15	11	3	39
83*	13	14	<20	40
84	14	9	<10	40
85	15	15	5	80
86	22	11	8	52
87	17	15	2	55
88	16	10	3	39
8ans	17	13	2	80

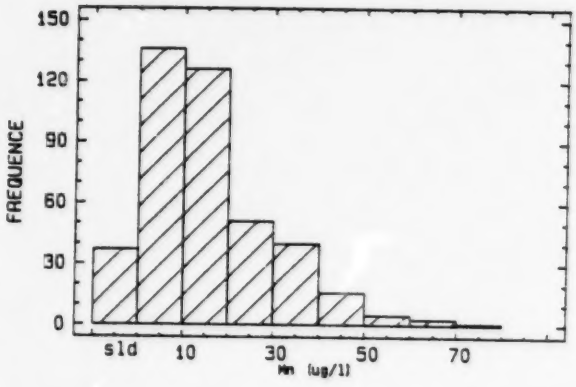
PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 8 SEMAINES
TYPE : NON MARK

NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) NO3 Fe P
Zn (-) pH

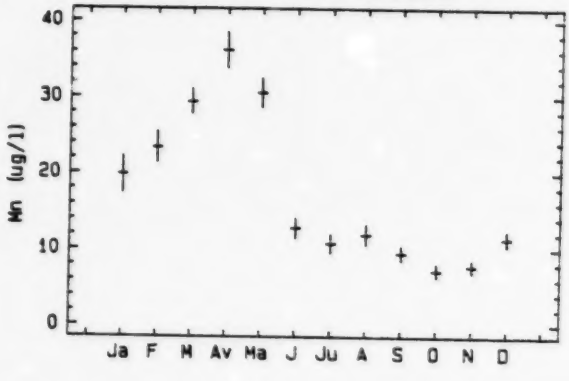
TENDANCE
REGRESSION : DIMINUTION
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

* Limite de détection élevée

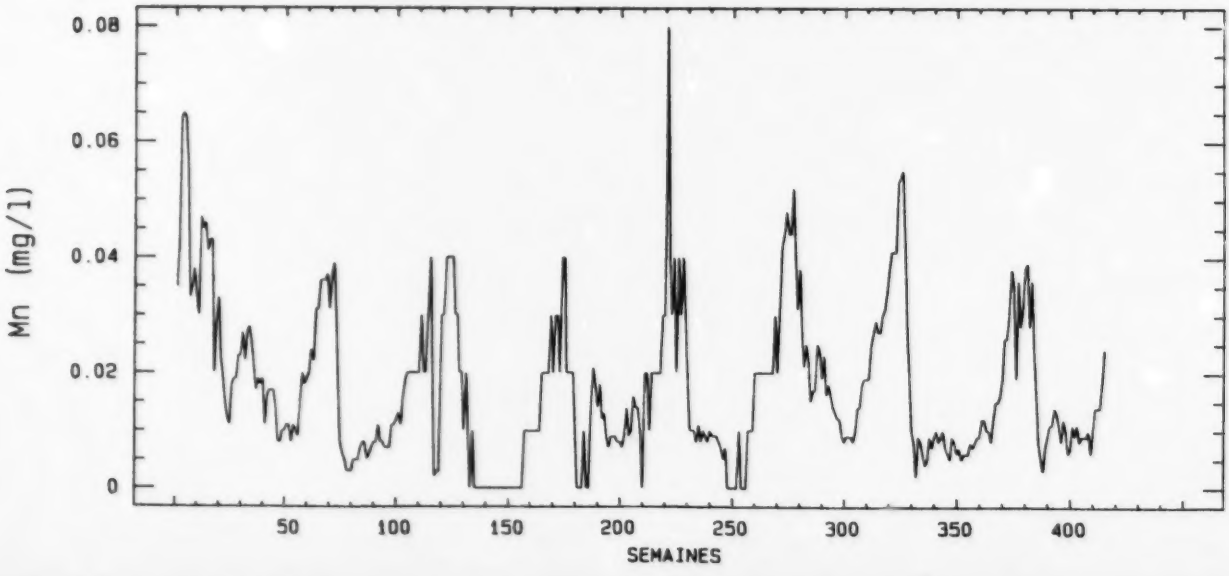
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

ZINC (µg/l)

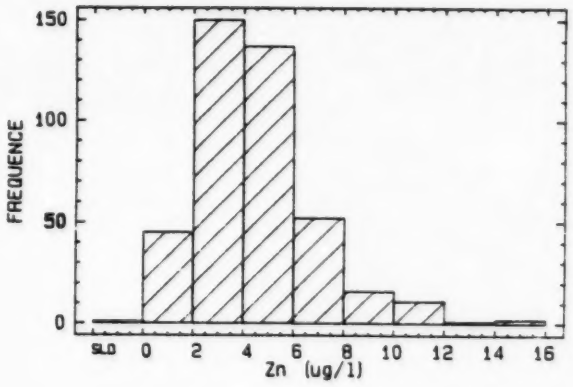
An	Moy	E.t	Min	Max
81	6.0	2.6	1	12
82	3.5	1.9	1	9
83	3.8	1.9	1	10
84	4.1	1.4	<1	8
85	6.4	2.2	3	12
86	5.9	2.3	3	13
87	5.2	2.9	2	16
88	4.9	1.8	2	10
8ans	5.0	2.4	<1	16

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 11 SEMAINES
TYPE : NON MARK (4)

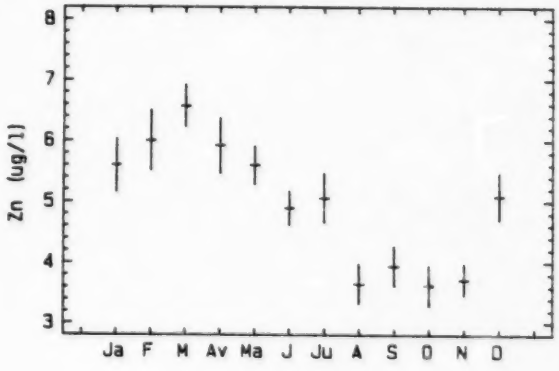
NORMALITE : NON
CORRELATION: (+) P Mn

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSCH&SLACK: NON
KENDALL SAI : NON

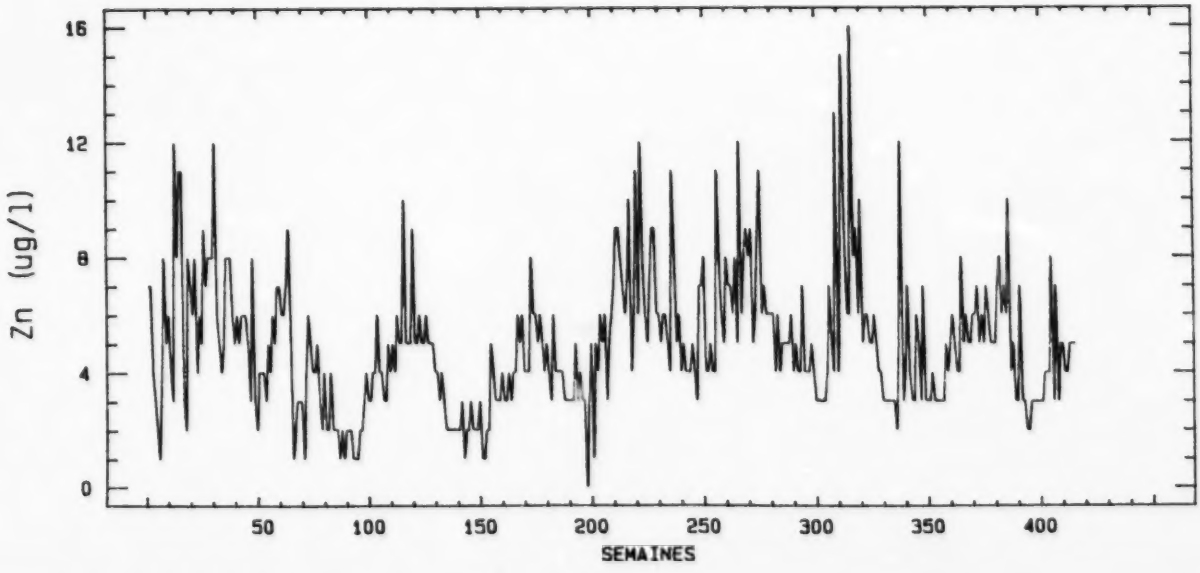
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

COULEUR (unité)

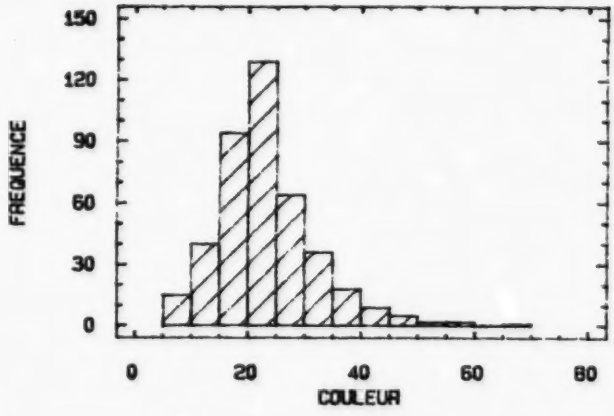
An	Moy	E.t	Min	Max
81	17.7	4.7	10	25
82	24.4	7.7	12	43
83	26.8	11.2	10	57
84	22.9	10.1	6	69
85	20.7	7.6	8	46
86	29.1	8.5	15	48
87	24.1	3.6	17	34
88	27.8	6.0	17	43
8ans	24.2	8.5	6	69

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 7 SEMAINES
TYPE : NON-MARK (3)

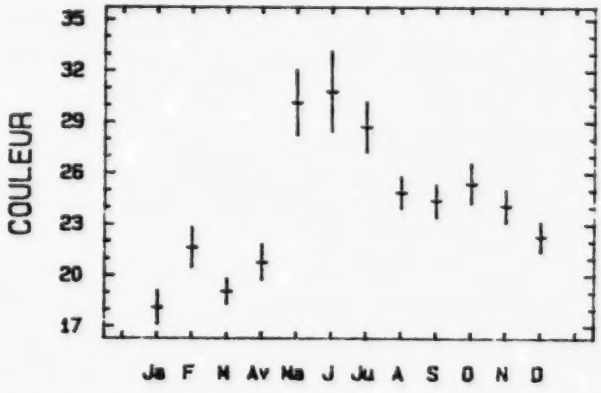
NORMALITE : NON
CORRELATION: (-) Na Ca Mg
(-)alcalinité

TENDANCE
REGRESSION : AUGMENTATION
HIRSH&SLACK: AUGMENTATION
KENDALL SAI: AUGMENTATION

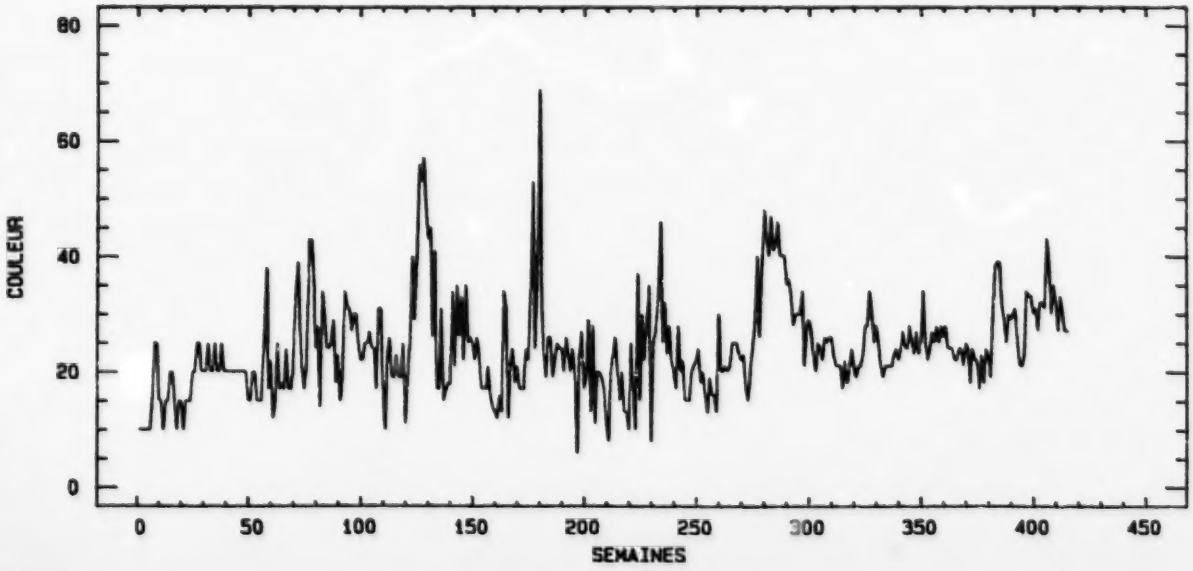
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

SULFATES (mg/l)

An	Moy	E.t	Min	Max
81*	3.62	0.29	3.1	4.1
82	3.73	0.45	3.0	5.0
83	4.05	0.35	3.4	4.8
84	4.12	0.33	3.4	4.9
85	4.47	0.41	3.6	5.7
86	4.26	0.47	2.3	5.9
87	4.27	0.46	3.3	5.8
88	4.37	0.38	3.3	5.3
8ans	4.14	0.48	2.3	5.9

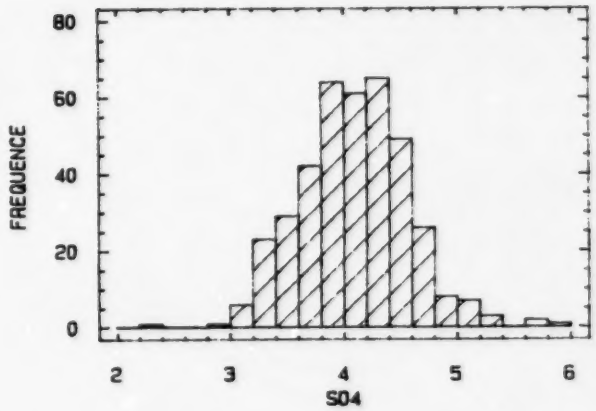
PERIODICITE: NON
PERSISTANCE: 11 SEMAINES
TYPE : NON MARK (5)

NORMALITE : OUI
CORRELATION: NON

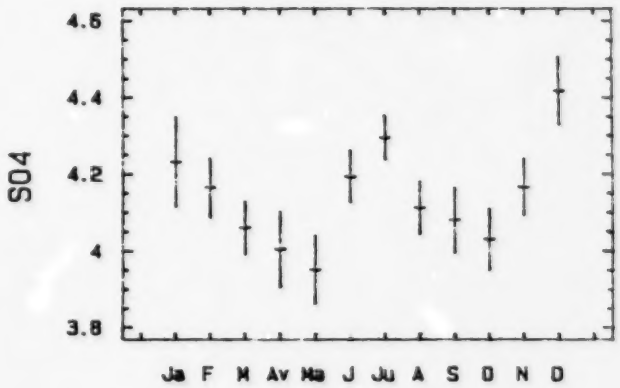
TENDANCE
REGRESSION : AUGMENTATION
SPEAR/LETT : AUGMENTATION
KENDALL/SPE: AUGMENTATION

* A partir du 14-7-81

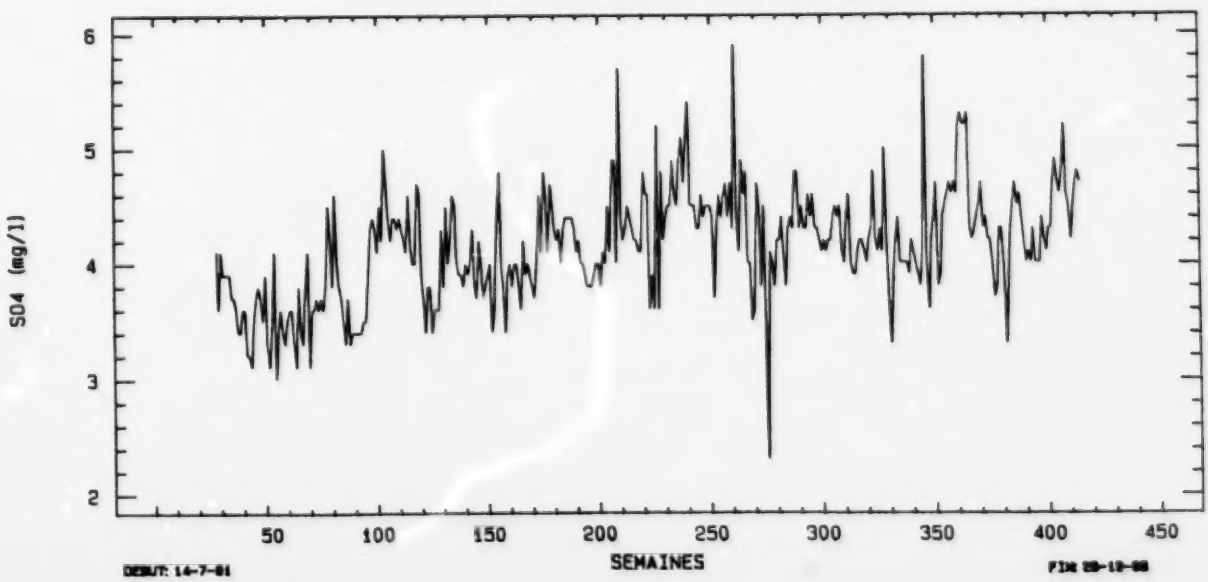
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

CHLORURES (mg/l)

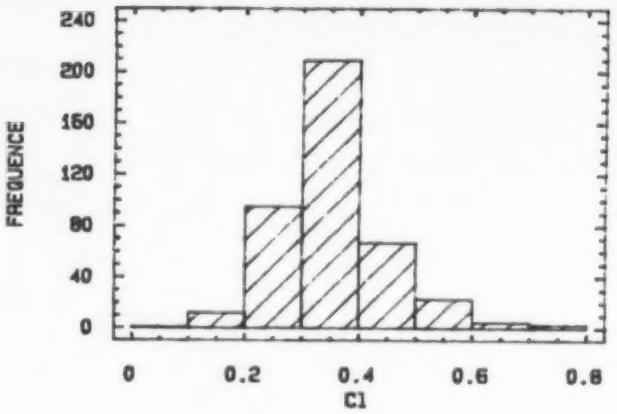
An	Moy	E.t	Min	Max
81	0.37	0.14	0.1	0.7
82	0.44	0.12	0.3	0.8
83	0.42	0.11	0.2	0.8
84	0.40	0.07	0.3	0.6
85	0.43	0.09	0.3	0.7
86	0.42	0.06	0.3	0.6
87	0.38	0.08	0.3	0.7
88	0.37	0.07	0.3	0.6
8ans	0.40	0.10	0.1	0.8

PERIODICITE: OUI
PERSISTANCE: 6 SEMAINES
TYPE : NON MARK (2)

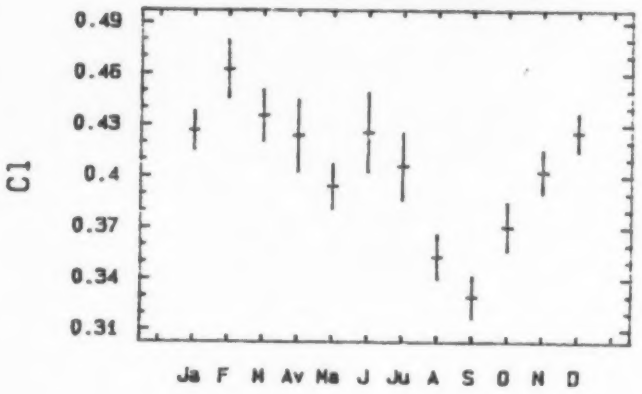
NORMALITE : NON
CORRELATION: NON

TENDANCE
REGRESSION : NON
HIRSH&SLACK: NON
KENDALL SAI: NON

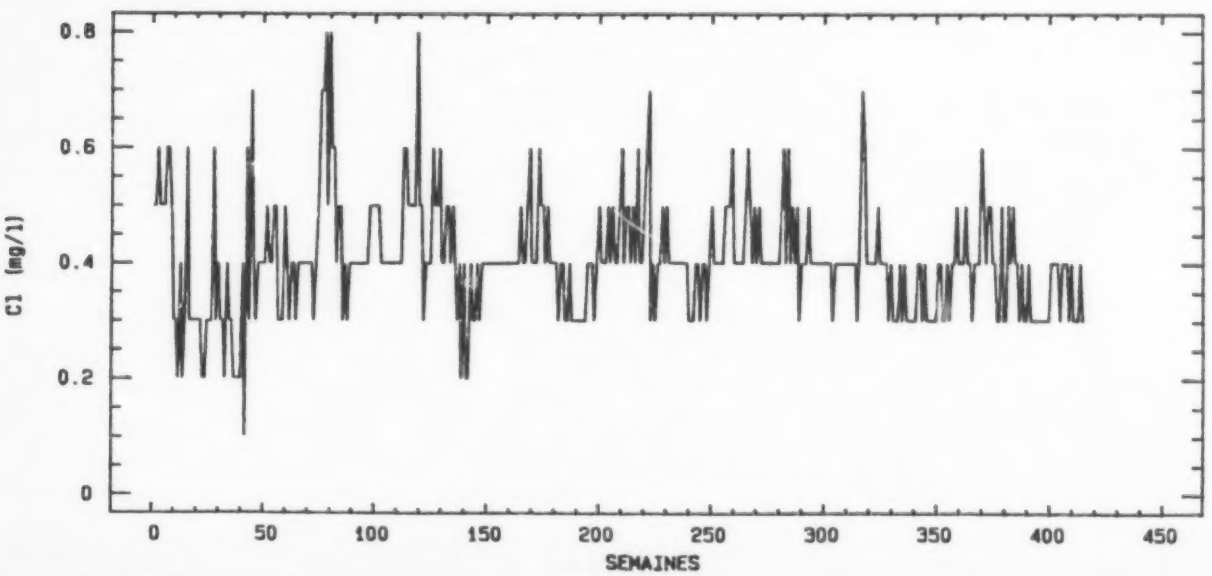
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



STATISTIQUES DESCRIPTIVES

ALUMINIUM (µg/l)

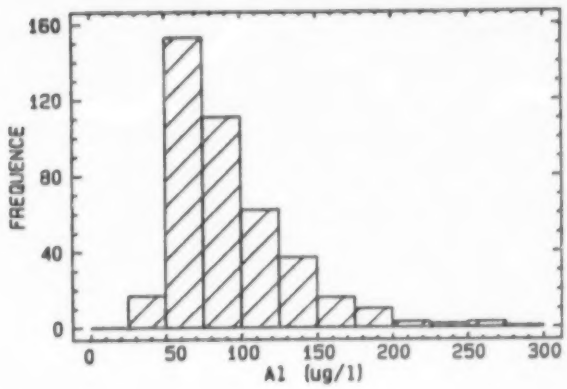
An	Moy	E.t	Min	Max
81	98	37	50	210
82	119	45	50	210
83	69	17	47	106
84	73	30	41	226
85	110	62	28	297
86	109	35	64	198
87	81	19	54	159
88	91	29	49	211
8ans	94	40	28	297

PERIODICITE: NON
PERSISTANCE: 11 SEMAINES
TYPE : NON MARK

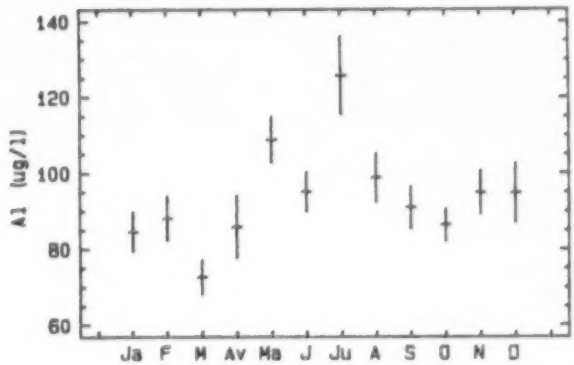
NORMALITE : NON
CORRELATION: (-) Mg, Alc

TENDANCE
REGRESSION : NON
SPEAR/LETT : NON
KENDALL/SPE: NON

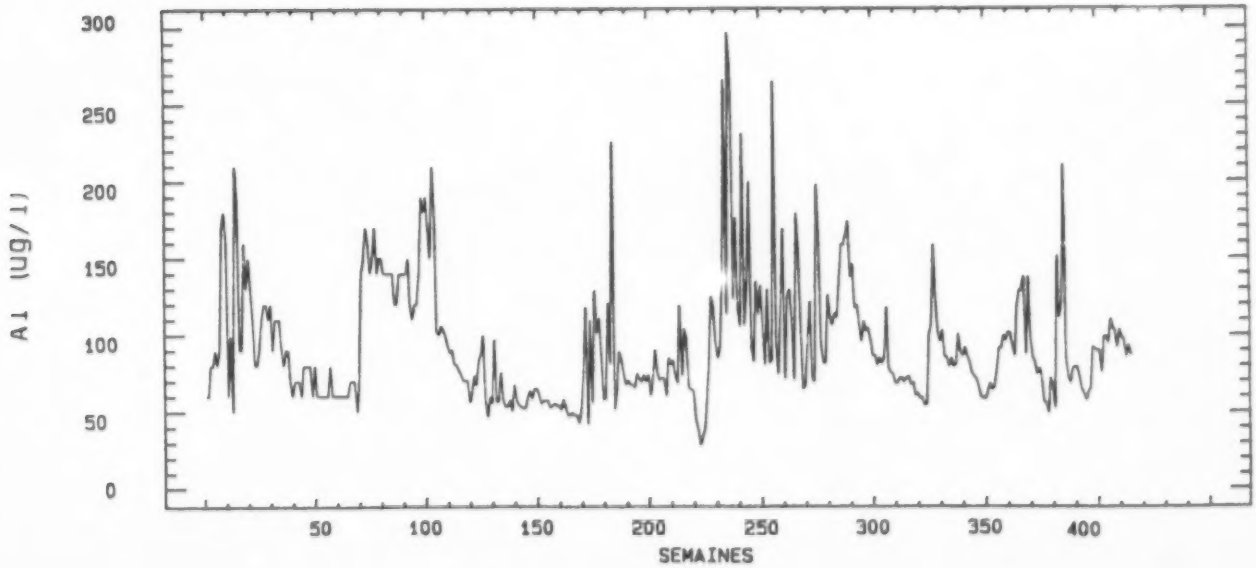
HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE



MOYENNES MENSUELLES



EVOLUTION TEMPORELLE DE 1981-1988



ANNEXE 5

CHARGES EXPORTÉES A L'EXUTOIRE PAR ANNEE HYDROLOGIQUES (KG/HA)

	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	Moy
SO_4	29,07	38,62	35,82	33,21	39,95	38,32	30,73	35,10
Alc.	26,59	34,93	30,06	27,04	30,03	28,80	26,93	29,20
Ca	15,60	18,55	16,54	14,80	18,43	17,14	14,18	16,46
Na	5,71	6,90	6,25	5,62	6,25	6,80	5,82	6,19
Mg	3,03	3,59	3,60	3,08	3,81	3,94	3,16	3,46
Cl	2,32	4,52	3,42	2,79	3,66	3,35	2,42	3,21
K	1,43	3,83	2,00	1,57	2,48	1,65	1,11	2,01
NO_3	0,99	1,37	0,98	0,90	0,60	0,41	0,47	0,82
Al	0,83	1,22	0,67	0,76	1,42	1,15	0,74	0,97
Fe	0,67	1,14	1,01	0,92	0,94	0,99	0,86	0,93
Mn	0,19	0,24	0,16	0,18	0,23	0,16	0,11	0,18
P	0,30	0,31	0,19	0,26	0,33	0,29	0,22	0,27
Zn	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04
H	0,010	0,025	0,010	0,010	0,008	0,004	0,004	0,01

ANNEXE 5

CHARGES SAISONNIERES A L'EXUTOIRE DE 1981 A 1988
(kg/ha)

HIVER (janvier à mars)

	81*	82	83	84	85	86	87	88
SO_4	——	1,77	5,89	2,14	2,69	3,45	1,71	3,00
Alc	4,77	4,18	6,08	4,04	4,34	5,09	2,67	3,92
Ca	3,38	1,46	3,44	1,57	1,72	2,06	1,05	1,67
Na	1,12	0,58	1,26	0,59	0,66	0,73	0,40	0,67
Mg	0,65	0,30	0,67	0,33	0,37	0,44	0,21	0,35
Cl	0,63	0,20	0,55	0,22	0,22	0,29	0,14	0,21
K	0,24	0,10	0,25	0,14	0,13	0,17	0,08	0,13
NO_3	0,44	0,09	0,35	0,09	0,08	0,09	0,05	0,07
Fe	0,19	0,05	0,14	0,08	0,12	0,12	0,09	0,10
Al	0,15	0,03	0,14	0,03	0,06	0,11	0,03	0,07
Mn	0,052	0,010	0,026	0,016	0,021	0,025	0,017	0,016
P	0,052	0,023	0,037	0,017	0,026	0,037	0,019	0,030
Zn	0,007	0,002	0,007	0,002	0,003	0,004	0,002	0,003
H	0,0052	0,0003	0,0008	0,0002	0,0003	0,0003	0,0001	0,0002

* estimation à partir des données du lac

PRINTEMPS (avril, mai)

	81	82	83	84	85	86	87	88
SO_4	——	7,84	15,53	16,28	14,77	15,74	12,21	11,02
Alc.	8,75	7,18	8,85	7,51	8,80	8,21	8,14	6,78
Ca	7,13	5,07	5,91	6,24	5,87	7,23	5,15	4,67
Na	2,16	1,47	1,87	2,29	2,11	2,16	2,00	1,74
Mg	1,36	0,80	0,96	1,31	1,12	1,40	1,10	1,02
Cl	0,98	0,81	1,86	1,39	1,28	1,67	1,03	0,98
K	0,72	0,76	2,88	0,61	1,03	1,48	0,47	0,54
NO_3	0,98	0,73	0,63	0,74	0,74	0,42	0,29	0,31
Al	0,48	0,37	0,40	0,35	0,43	0,69	0,50	0,33
Fe	0,464	0,240	0,491	0,465	0,454	0,409	0,363	0,404
Mn	0,115	0,085	0,179	0,105	0,127	0,166	0,067	0,067
P	0,174	0,096	0,137	0,076	0,104	0,149	0,099	0,089
Zn	0,017	0,007	0,020	0,016	0,023	0,021	0,013	0,015
H	0,0125	0,0082	0,0212	0,0078	0,0082	0,0063	0,0020	0,0025

ANNEXE 5 (SUITE)

ÉTÉ (juin à août)

	81	82	83	84	85	86	87	88
SO_4	----	5,17	8,63	8,40	11,75	13,49	5,66	7,48
Alc.	7,12	6,37	7,40	5,79	7,45	7,19	4,93	5,99
Ca	5,30	2,92	3,74	3,45	4,58	5,60	2,61	3,25
Na	2,06	1,16	1,46	1,33	1,64	2,25	1,14	1,37
Mg	1,18	0,63	0,84	0,76	0,95	1,39	0,64	0,78
Cl	0,79	0,84	1,07	0,67	0,96	1,22	0,42	0,54
K	0,38	0,30	0,80	0,19	0,45	0,71	0,13	0,30
NO_3	0,10	0,05	0,06	0,02	0,03	0,01	0,00	0,01
Al	0,31	0,22	0,16	0,13	0,36	0,39	0,13	0,15
Fe	0,213	0,079	0,213	0,141	0,188	0,287	0,108	0,157
Mn	0,069	0,011	0,033	0,019	0,028	0,052	0,014	0,023
P	0,112	0,040	0,047	0,045	0,066	0,081	0,032	---
Zn	0,017	0,004	0,008	0,006	0,012	0,012	0,005	0,004
H	0,0013	0,0007	0,0009	0,0008	0,0011	0,0016	0,0003	0,0004

AUTOMNE (septembre à décembre)

	81	82	83	84	85	86	87	88
SO_4	5,53	12,03	8,77	7,36	9,01	10,91	11,06	15,73
Alc.	8,11	13,64	11,11	8,12	9,28	10,80	11,30	10,78
Ca	3,77	6,29	4,98	3,77	4,56	5,34	5,23	6,90
Na	1,60	2,61	1,91	1,53	1,72	2,15	2,27	2,65
Mg	0,75	1,33	1,12	0,83	1,02	1,24	1,15	1,44
Cl	0,52	1,28	0,74	0,63	0,74	0,96	0,80	1,25
K	0,19	0,40	0,44	0,21	0,38	0,38	0,31	0,38
NO_3	0,07	0,33	0,09	0,07	0,05	0,06	0,09	0,10
Al	0,12	0,46	0,13	0,14	0,26	0,23	0,21	0,33
Fe	0,161	0,429	0,248	0,203	0,221	0,257	0,250	0,31
Mn	0,024	0,026	0,000	0,014	0,011	0,023	0,013	0,031
P	0,065	0,097	0,053	0,081	0,080	0,089	0,069	-----
Zn	0,007	0,007	0,004	0,004	0,009	0,008	0,008	0,011
H	0,0006	0,0020	0,0012	0,0008	0,0007	0,0005	0,0006	0,0013